



ESTUDIO DE VIABILIDAD DE LA ENERGÍA MINI-EÓLICA PARA EL ABASTECIMIENTO DE UNA CASA AISLADA DE LA RED ELÉCTRICA

**(RESUMEN DE LA TESIS REALIZADA EN INTERCAMBIO
ERASMUS;
“STUDIO DELLA ENERGIA MICROEOLICA PER CASA
ISOLATA”)**

Alejandro Matanzo Senra

Introducción

El objetivo principal de este proyecto realizado en Italia, en la “università politecnica degli studi di cassino (Roma)”, fue el estudio de viabilidad tanto en materia tecnológica como económica de la aplicación de la energía eólica a pequeña escala en lugares aislados de la red eléctrica. Para el estudio se contó con un trabajo sobre el diseño de las piezas de montaje de un pequeño aerogenerador ya realizado anteriormente por el departamento de energías renovables de la università di Cassino, y datos proporcionados por el CIEMAT [Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas], como grandes fuentes para el estudio. Se realiza también un estudio económico de viabilidad de este proyecto y su amortización y un estudio del impacto ambiental de esta tecnología.

Se profundiza en el estudio primario del diseño. Esto es, en el estudio de los vientos aprovechables, de la cantidad de energía que podemos obtener en base a estos y de la selección final de la ubicación de los aerogeneradores, así como en el estudio energético de una vivienda unifamiliar de referencia como punto de partida para dicho estudio, en la que se toman datos de gasto energético medio de cada aparato conectado a la red doméstica (datos proporcionados por CIEMAT).

Como nota final a esta introducción, decir que ahora mismo me encuentro realizando físicamente este proyecto, englobado en un proyecto solidario para abastecer agua a poblaciones desfavorecidas del centro de África. Proyecto que llevaremos a cabo con la ONG “SOSH2O”, en la que ahora trabajo. El proyecto ha sufrido variaciones en cuanto al original, sobre todo mejoras en cuanto a su diseño original y un aumento de tamaño y potencia, ya que ahora nos encontramos con un aerogenerador de mas de 1KW que será capaz de bombear agua (con una bomba eléctrica), haciendo posible el uso de pozos profundos inaccesibles anteriormente (con más de 70m de profundidad) en la época seca de las regiones Centrafricanas. También en este proyecto está prevista la colaboración futura con la Universidad Carlos III, gracias a D. Juan Carlos García-Prada, el coordinador de este mismo proyecto a quien agradezco su ayuda constante y colaboración.

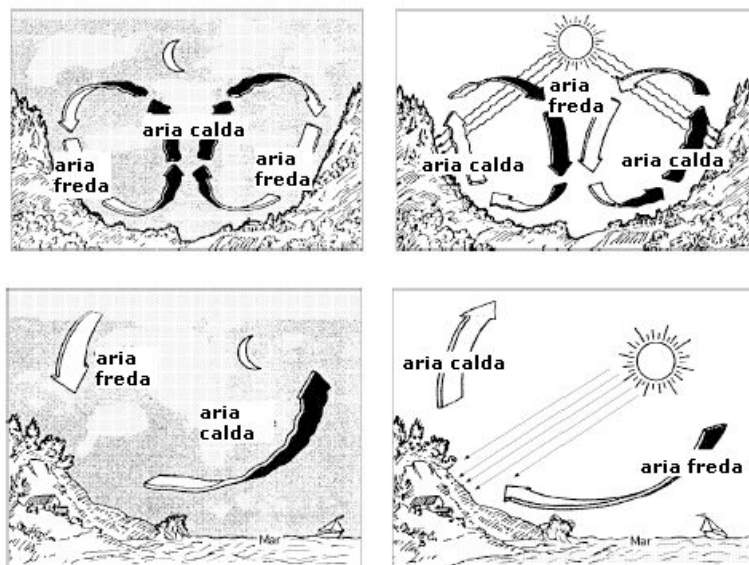
Energía eólica extraíble del viento.

En este capítulo se explica con detalle de donde viene el viento, los tipos de vientos, cuales son aprovechables y la cantidad de energía que podemos obtener del mismo, todo ello imprescindible para el diseño y dimensiones del molino, y la selección del emplazamiento.

La tierra recibe $1,74 \cdot 10^{17}$ W de potencia del sol, de la cual solo un 2% se transforma en energía eólica.

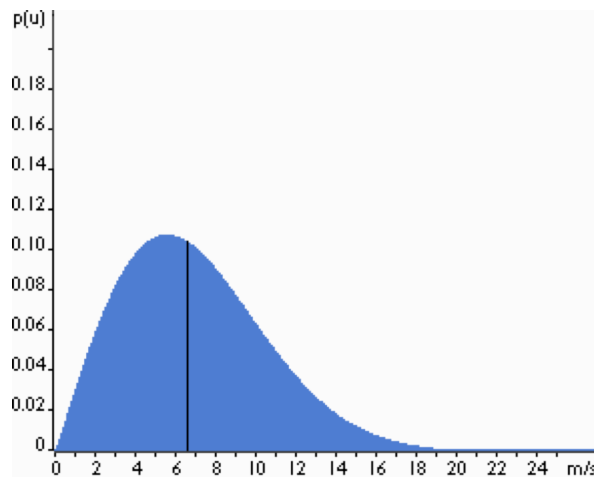
ORIGEN DE LA ENERGÍA EÓLICA

El sol calienta la tierra y por tanto el aire que está encerrado en ella. Debido a este calentamiento y al movimiento de la tierra (fuerzas de coriolis), se generan los distintos vientos. De estos son muy importantes para la energía eólica los vientos de valle y montaña y las brisas marinas, que se originan como consecuencia del gradiente de temperatura originado entre el día y la noche.



VARIACIÓN DEL VIENTO

Para la industria eólica, es muy importante saber como describir la variación de la velocidad del viento. Es, de hecho, un dato muy importante para los diseñadores de aerogeneradores para optimizar el diseño en función de la zona donde se sitúen los mismos. Un modelo usado para describir esta variación es la “Distribución de Weibull”.



El gráfico de la figura muestra una distribución de probabilidad. El área bajo la curva vale exactamente la unidad. Así pues la probabilidad de que el viento sople a alguna velocidad debe ser el 100%. La elección de este tipo de distribución es que la probabilidad de que el viento sople moderadamente, es mayor que la probabilidad de que sople fuerte. Por tanto, para el diseño de un aerogenerador, no basta con considerar medias de velocidad, necesitamos ponderar la probabilidad de cada velocidad del viento con la potencia extraíble a esa velocidad.

SELECCIÓN DE LA UBICACIÓN

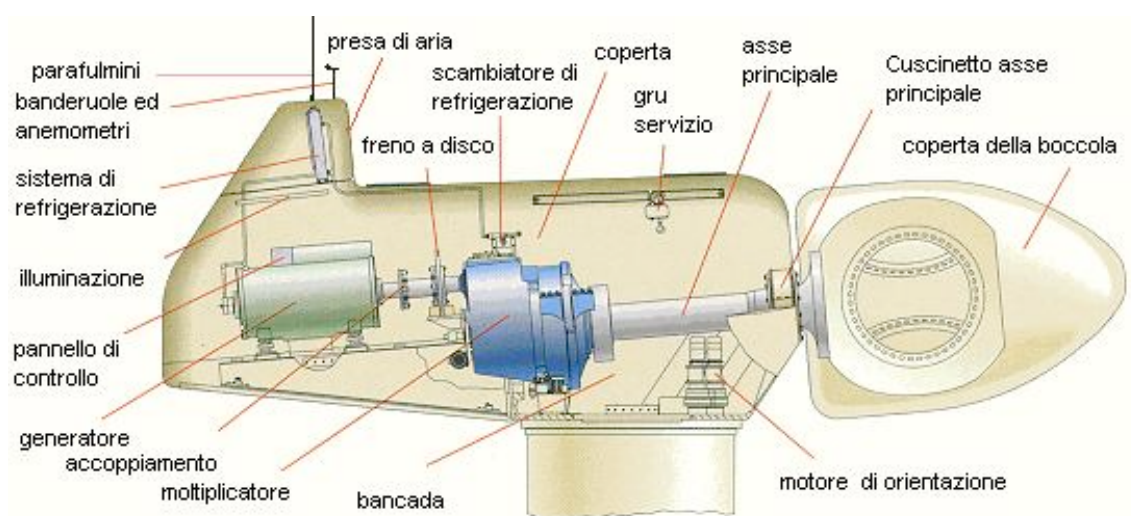
Todos estos datos se han tenido en cuenta, por supuesto, en el planteamiento para la ubicación del nuevo aerogenerador. Esto con respecto a las pruebas de potencia y de fatiga que se están realizando, porque “in situ”, la posición del aerogenerador la marcará mas la situación de los distintos pozos de agua, y la distancia a estos.

Para proceder a la correcta instalación de un generador eólico, ya sea de grandes dimensiones o, como en este caso, la microeólica, no basta hacer un estudio de productividad basado en mapas eólicos, sino que requiere de la instalación de sensores de medida en el terreno donde queremos situarlo, son datos recabados de al menos un año entero. Tenemos que tener en cuenta la estela de todos los objetos que se encuentran en torno al aerogenerador, sobre todo los que se encuentran en las direcciones de los vientos dominantes de la zona.

AEROGENERADORES

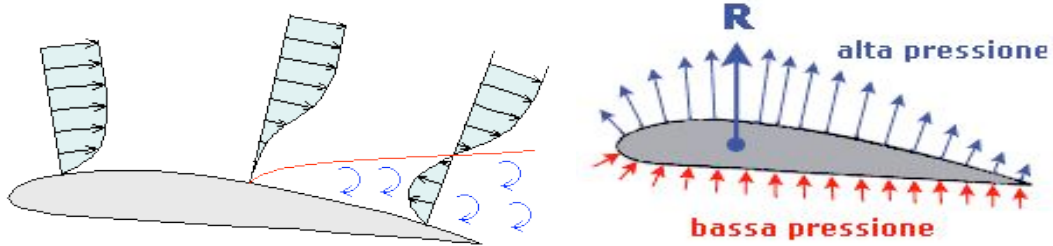
En este capítulo se describen las distintas partes que componen un aerogenerador, desde los aerogeneradores con caja multiplicadora, hasta los mas pequeños y el principio de funcionamiento de cada uno, como parte fundamental para el estudio de nuestro proyecto.

En la siguiente figura se pueden ver las distintas partes que componen un gran aerogenerador (de los que vemos desde las carreteras).



Como funcionamiento del mismo, cabe destacar para nuestro resumen la manera en que se mueven las palas, ya que esta no es por fuerza como cabría pensar en un primer momento (como ocurre en los molinos americanos), sino por sustentación aerodinámica (como en los aviones).

La sustentación de los álabes (palas), es una fuerza, perpendicular a la dirección del viento y es producto de la diferencia de presiones entre las superficies superior e inferior del álabe, esto se debe a que el aire que viaja (capa límite) por la superficie superior se mueve más rápido que la misma molécula que se mueve por la superficie inferior. Si la inclinación de las palas es demasiado elevada, se puede producir la pérdida de sustentación, donde el aire deja de estar en contacto laminar con la superficie del álabe. Esto se utiliza en ocasiones como mecanismo para el frenado del aerogenerador.(fig.2)



Definición de las prestaciones

SELECCIÓN DE LA POTENCIA

En este capítulo se define o calcula la potencia del aerogenerador en base a un estudio realizado en una casa modelo. Esto es, se ha tomado una vivienda unifamiliar de ocupación media, con un tiempo de ocupación medio-alto (primera vivienda), en el que se tomaron medidas standard de consumo de electrodomésticos y demás aparatos eléctricos conectados a la misma, con el tiempo estimado de conexión de cada uno de ellos por día y por hora, lo que nos da una estimación bastante buena del consumo diario de la casa en funcionamiento normal y podemos realizar un cálculo en base a estos datos. Estos consumos han sido tomados de un libro del CIEMAT.

ESTUDIO EÓLICO

Una vez realizado el estudio del consumo de la casa hay que ver que cantidad de energía somos capaces de extraer del viento en la zona seleccionada.

La potencia eólica que podemos extraer del viento es;

Donde “v” es la velocidad media mensual medida a 10 metros de altura. Si no tenemos mediciones a 10 metros de altitud (standard español), podemos corregirlo mediante la expresión;

En el caso que ahora mismo nos atañe, hemos realizado los cálculos eólicos, en base a una estación eólica muy cercana a la fábrica donde se encuentra ahora mismo el aerogenerador, y hemos instalado una estación meteorológica propia para hacer

mediciones de la velocidad del viento a la vez que hacemos pruebas de potencia. De esta manera podemos obtener las curvas de potencia del aerogenerador de manera fidedigna.

Ahora bien, la velocidad del viento sigue una distribución Weibull como ya hemos visto, pero en nuestro caso (*pasado*), podemos simplificar los cálculos suponiendo que el aerogenerador se distribuye según un histograma de cargas. Así obtenemos la velocidad ponderada estimada.

Con esta misma, podemos calcular la estimación de la energía eólica extraíble en el emplazamiento, contando con la máxima teórica posible (límite de Betz). Y así, hacemos una tabla de la potencia eléctrica extraíble según el área barrida (diámetro de las palas)

SELECCIÓN DE LA POTENCIA DEL AEROGENERADOR

Teniendo en cuenta las especificaciones de la casa, vemos que necesitamos un aerogenerador de grandes dimensiones. Exactamente un aerogenerador con 6m de diámetro de las palas para obtener la potencia mínima calculada. Pero, teniendo en cuenta que la demanda de electricidad no es siempre la potencia mínima calculada, podemos restringir aún más este valor. Además, diseñando bien el sistema de baterías podemos obtener una potencia mínima para la casa con valores más acotados del aerogenerador, en cuanto a sus dimensiones. Al valor final calculador, habrá que sumarle el consumo de energía del sistema eléctrico, que se estima en un 10% del total. [CIEMAT]

Con esto quedaría;

De tal manera que el diámetro final del aerogenerador bastaría con 2,5m de diámetro (tabla 4.6)

Una comprobación importante llegados a este punto, es verificar que la velocidad en punta de pala no sea superior a la velocidad del sonido. Si llegase a ser superior podría producirse “cavitación en punta de pala”, con una reducción importante del rendimiento del aerogenerador y efectos de desgaste, vibración y erosión. El cálculo lo realizamos de la siguiente manera;

Para concluir se realiza el cálculo del número óptimo de palas del aerogenerador. Para el mismo necesitamos conocer la velocidad específica, que se calcula de la siguiente

manera, como la relación entre la velocidad en punta de pala y la velocidad ponderada del viento.

Y en base a esto determinamos que el número óptimo de palas es 3.

PROYECTO DE LOS ELEMENTOS DEL AEROGENERADOR

En el siguiente capítulo se realiza un estudio de los distintos órganos que componen el aerogenerador, en base a un estudio ya comenzado anteriormente por el departamento de mecatrónica de la università degli studi di cassino. Se realiza un estudio de cada componente, del montaje de los mismos.

El resultado final es un aerogenerador con eje horizontal, con las palas situadas a sopravento, con un rotor de 3 palas, orientación por veleta de cola, torre tubular atirantada, y sistema de freno mecánico.

(Como este diseño ha cambiado mucho, en el anexo realizaré una síntesis del modelo que se está fabricando ahora mismo, ya que, además de parecer más interesante, es real.)

ANÁLISIS ECONÓMICO

En este capítulo se realiza un estudio económico del proyecto, con el fin de valorar la conveniencia económica y el período de amortización del mismo.

Realizamos primero un estudio económico de todos los componentes;

COMPONENTI COMPRATI	PREZZO (€)
Alternatore	300
Batteria	250
Investitore	185
Raddrizzatore	185
Cuscinetto rigido di palle di contatto angolare 7211 B	40
Cuscinetto rigido di palle di contatto angolare 7214 B	40
2 cuscinetti rigidi di palle	45
2 lubrificanti	20
Altri: viti, dadi, rondelle, unisce.	35
COMPONENTI FABBRICATI	PREZZO (€)
Gondola	900
Pallade	200
Torre	300
TOTALE PRESUPPOSTO	2500

Una vez realizado este, se calcula el precio del KW.h generado por el aerogenerador de baja potencia para, de esta manera, compararlo con el precio del KW.h suministrado por la compañía eléctrica.

La tasa interna del rendimiento depende del interés aplicado e del período de vida de la instalación. En la siguiente se muestra el cálculo de la Tasa Interna de Rendimiento [Gov.italia]

La tasa de interés aplicado “ r ”, y la tasa de interés medio del dinero en el momento de estudio. Este parámetro funciona de tal manera que si el gasto financiero asociado a la amortización varían en manera que el precio de la energía generada sea mayor o menor. En cuanto a la vida útil de la instalación “ n ”, y el tiempo estimado de funcionamiento. Así, estimando una r de 0,07 y una n de 15 años, calculamos el TIR del proyecto.

Una vez fijado el TIR se dan los siguientes parámetros; CC (costo del capital), I (invertimiento inicial), FC (factor de capacidad);

De esta manera calculamos que el coste del precio es de 0,079€/kW.h. Sabiendo que el coste de adquisición de la energía es de 0,1€/kW.h (Italia), podemos afirmar que el proyecto es factible.

CALCULO DEL PERÍODO DE RETORNO

En este capítulo se realiza un estudio del período del retorno del capital invertido, el cual es de 5 años.

IMPACTO AMBIENTAL

Por último se realiza un estudio del impacto ambiental de los aerogeneradores. Dando una visión global con distintos puntos de vista tanto a favor como en contra.

CONCLUSIONES

- I. El coste de generación de 1kW.h de una fuente eólica es seguramente inferior al mismo comprado a una compañía eléctrica. En realidad la energía eólica (parques) puede competir en rendimiento con otras fuentes de energía tradicionales como las centrales térmicas de carbón, las centrales de combustible e, incluso, con la energía nuclear, además del beneficio ambiental que estas proporcionan.
- II. El rendimiento de una instalación micro-eólica depende, en general, del rendimiento de las palas y del rendimiento del alternador. El aspecto negativo podría deberse a la doble transformación de la energía eólica en energía mecánica (rendimiento de las palas), y de la energía mecánica en energía eléctrica (alternador). El uso de sistemas de acumulación de energía podría permitir el uso de la energía eólica producida en ausencia de la fuente eólica. La mejor solución para tener una fuente alternativa de energía como uso cotidiano sería mediante sistemas híbridos, esto es, sistemas compuestos por aerogeneradores de baja potencia funcionando en paralelo con sistemas de paneles fotovoltaicos.
- III. El coste de manutención es función del alternador escogido, así como también el diseño resulta simplificado.
- IV. El “pay-back” de la inversión está en torno a 4 años, muy competitivo con el período de vida estimado del aerogenerador en 11 años. La energía eólica no produce ningún agente contaminante que incida en el ecosistema. Por cada kW.h generado mediante energía eólica se evitan;
 - A. 0,60 kg de CO₂
 - B. 1,33 g de SO₂
 - C. 1,67g de NO_x

Anexo

En el siguiente anexo se presenta el aerogenerador a día de hoy, con todas las modificaciones y mejoras de diseño hasta la etapa en la que nos encontramos.

Diseño de los órganos del aerogenerador

Antes de definir los parámetros de las palas, torre, generador y demás partes del aerogenerador, vamos a realizar un cálculo de los esfuerzos sufridos en torre y palas para comprobar que no tengamos que variar ningún parámetro.

Así pues, los parámetros de diseño que definen nuestro aerogenerador serian estos;

Aerogenerador de eje horizontal, tripala a barlovento, con generador síncrono de imanes permanentes de flujo axial, orientado por timón de cola y regulación de velocidad por cabeceo. Con un sistema de frenado incorporado para vientos máximos. Diámetro del rotor de 3 metros (135 cm de pala + eje) y ángulo de ataque moderado (12-16°), generando una potencia de 1000W, con un regulador de potencia eléctrica conectado antes de las baterías y un inversor de alterna para el uso de aparatos eléctricos convencionales.

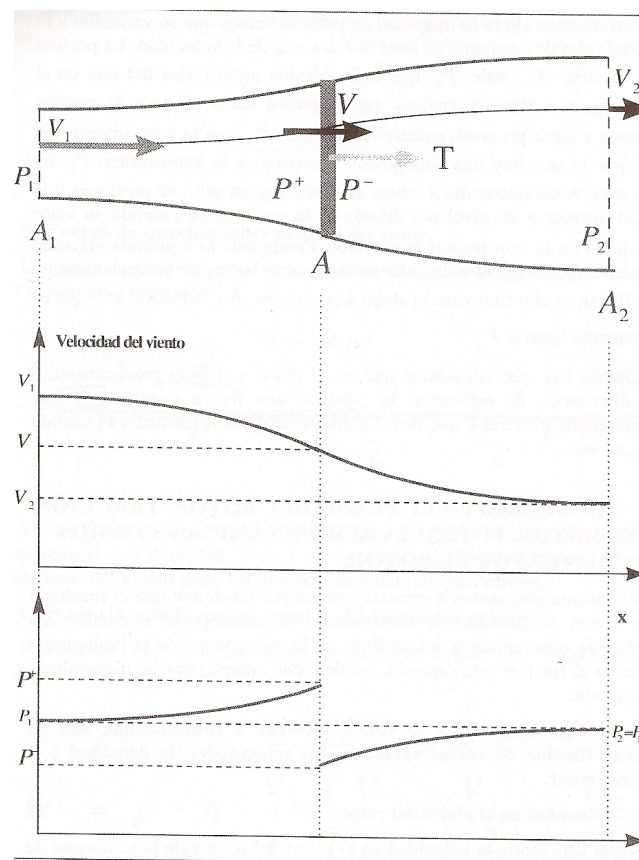
DISEÑO DE LAS PALAS

Esta es la etapa mas delicada del diseño, ya que se manejan un gran número de parámetros en el diseño. No vamos a exponer todos los cálculos que se deben de realizar, pero sí esbozar como ha sido el cálculo para las mismas.

Estudiando las fuerzas que actúan sobre el rotor en el momento en el que capta la energía del viento, y haciendo las suposiciones de la hipótesis de la cantidad de movimiento, esto es;

- Suponemos el aire como fluido ideal
- Movimiento subsónico y a Mach bajos
- No tenemos en cuenta la velocidad de giro del rotor y los vectores velocidad son siempre paralelos al eje de simetría del tubo de corriente
- Rotor como “Disco de Froude”
- Las magnitudes empleadas en una sección recta al tubo de corriente son equivalentes a la sección.

Partiendo de estas hipótesis, tomamos un tubo de corriente en torno a nuestro aerogenerador;



Vemos que las velocidades aguas arriba y aguas abajo son distintas, y también el campo de presiones. Esta diferencia de presión a ambas partes del rotor, produce una fuerza resultante **T**, que será la fuerza con la que calcularemos el momento flector que el rotor produce sobre la torre.

Siendo;

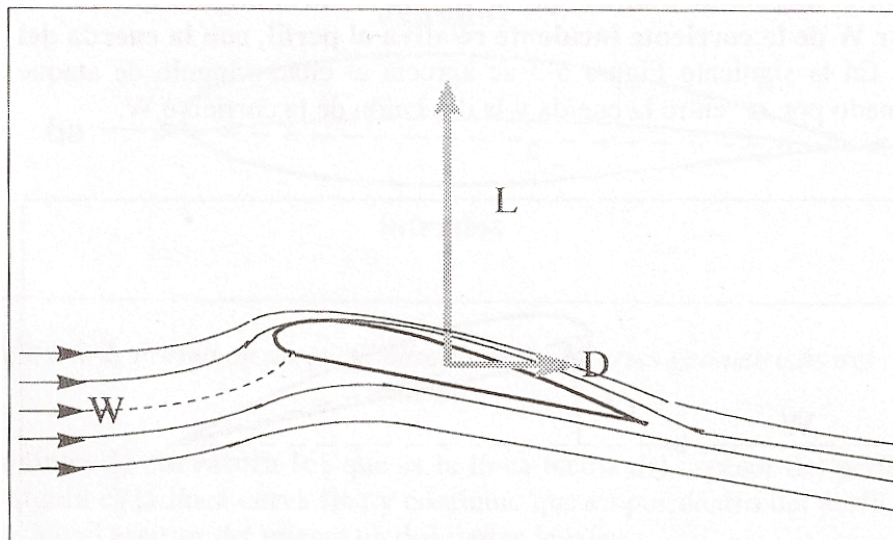
$$- v = v_1 + v_2 / 2$$

$$- T = \rho \cdot A \cdot (v_1^2 + v_2^2) / 4$$

PERFIL AERODINÁMICO

El perfil que vamos a utilizar para las palas del aerogenerador es el perfil **NACA4412**, por ser este un perfil muy usado en rotores, disponer de tablas, y tener este uno de los lados plano, lo cual nos facilitará la producción. Diseñaremos el perfil con un ángulo de ataque moderado, (ángulo que forma la velocidad relativa del viento con la cuerda del perfil), esto es, entre 12-16°, lo que nos permitirá aprovechar vientos flojos y facilitará el arranque del rotor.

Es muy importante que obtengamos el borde de salida del perfil lo mas agudo posible, ya que así la propia viscosidad del aire producirá el máximo de sustentación



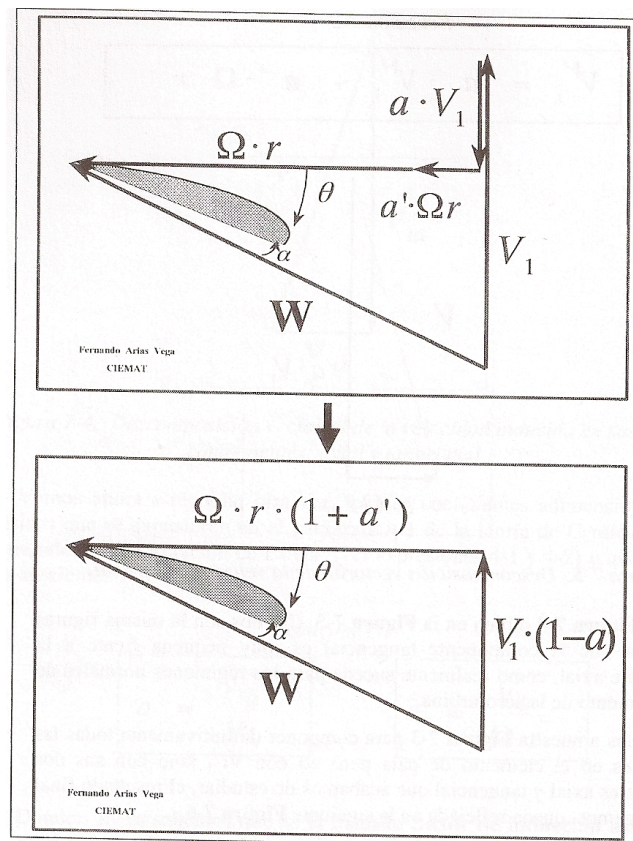
Por ahora tenemos;

- Rotor de **3m** de diámetro
- Perfil de palas **NACA4412**
- Ángulos de ataque entre **12-16°**

Tenemos que conseguir la variación del ángulo aerodinámico con el radio y la longitud de cada cuerda.

Para estos cálculos, usaremos el “Modelo Trapezoidal”, que nos simplificará mucho la fabricación de las palas. Con este modelo, suponemos que las cuerdas siguen una distribución lineal con las cuerdas mas pequeñas en la punta y las mas grandes hacia el encastre.

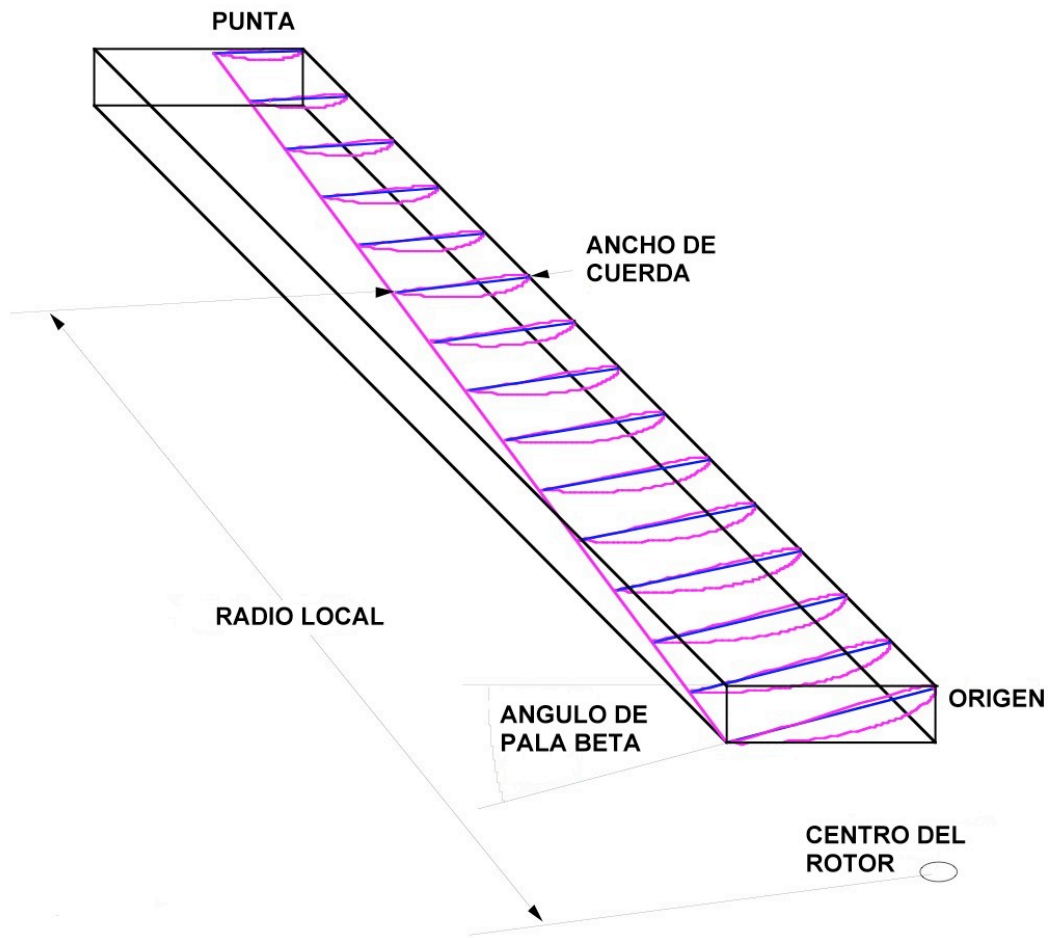
Ahora ya solo nos queda ver la relación de los ángulos dentro de los álabes. Mediante la “teoría del elemento de pala”, estudiando las velocidades en un elemento de pala de un rotor aerodinámico;



Vemos que el triángulo de velocidades varía a lo largo de la envergadura de la pala, esto es, se va cerrando a medida que nos alejamos del centro del rotor en torno a su ángulo aerodinámico. Ahora bien, para conseguir el deseado ángulo de ataque moderado, resulta que para acomodarlo al ángulo aerodinámico, no queda mas remedio que disminuir el ángulo “teta” progresivamente, esto es, **necesitamos dar progresivamente una torsión al álabe a medida que nos alejamos del rotor.**

Así, tenemos todos los parámetros de construcción definidos, quedando nuestro modelo trapezoidal;

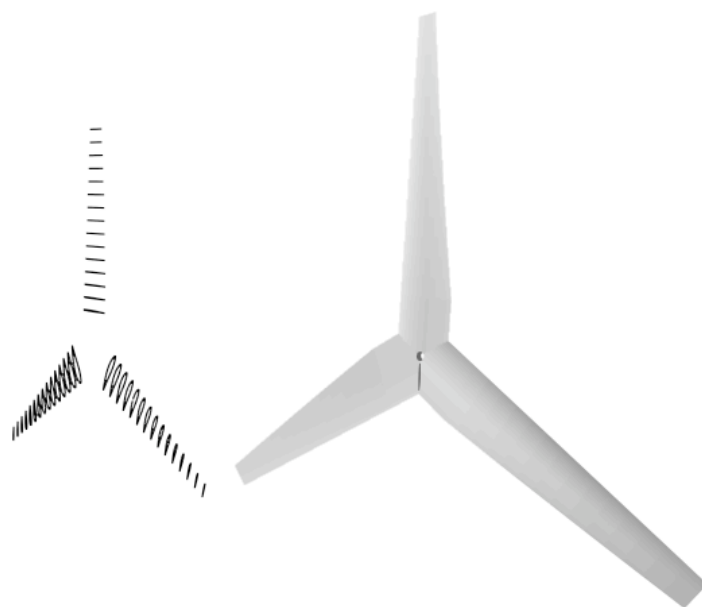
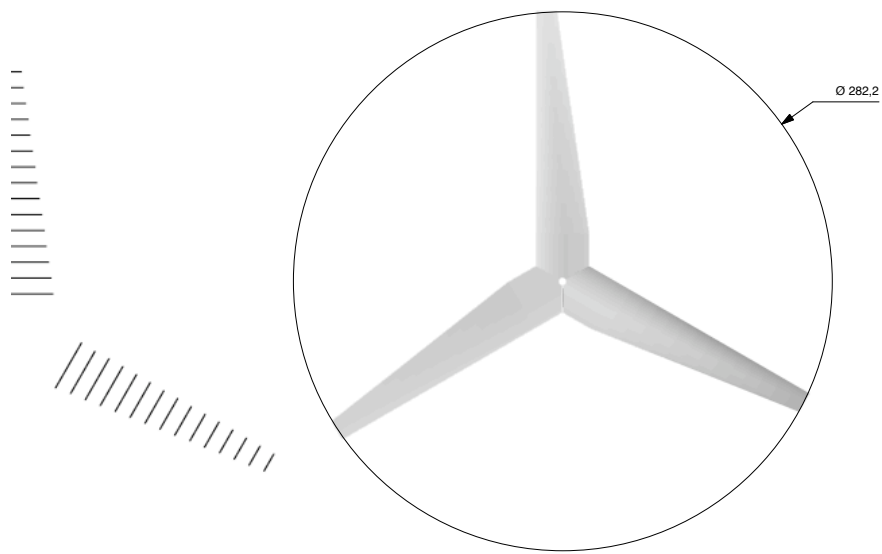
Este modelo es muy usado en navales y aeronáutica y se basa en dar las coordenadas en torno al centro del rotor de un número de secciones del perfil NACA 4412 con sus cuerdas y ángulos de ataque correspondientes. De esta manera queda todo el perfil de pala diseñado. Las cuadernas se realizan después en aluminio y sirven de base para hacer el molde de los álabes.

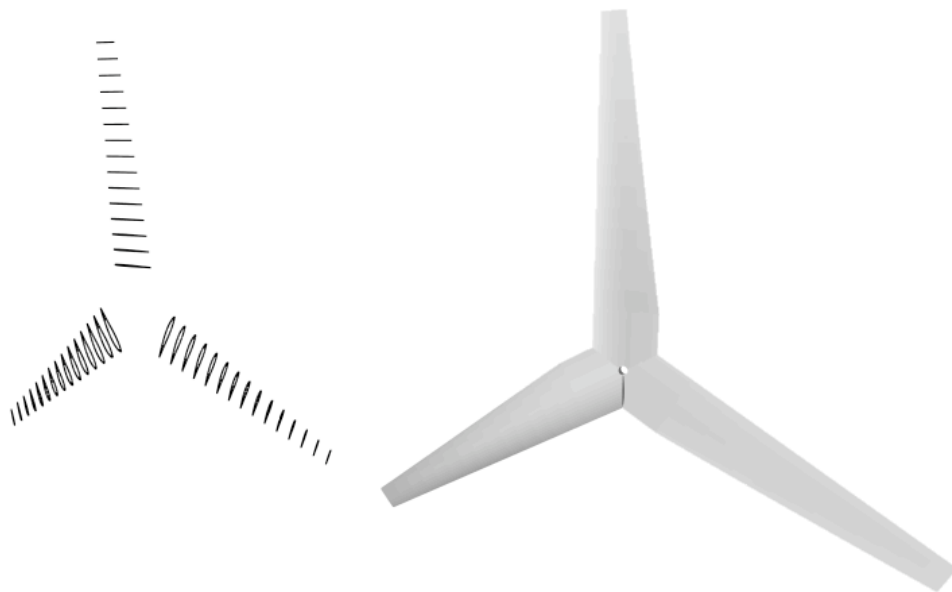
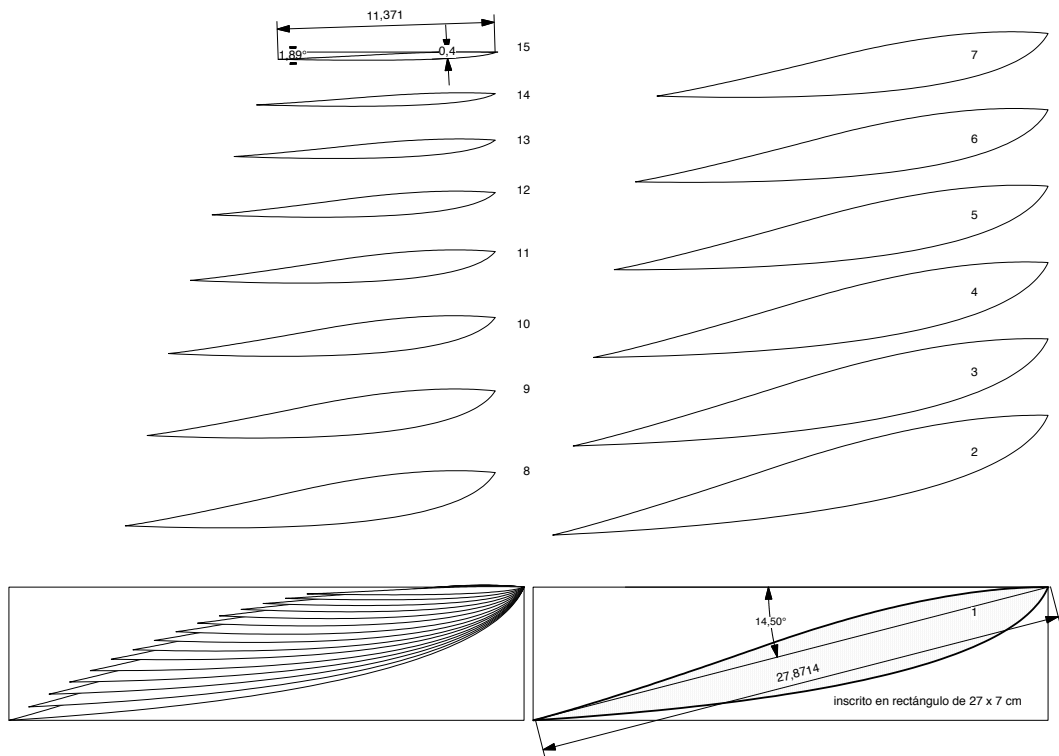


Para el cálculo de cada sección, partimos de un modelo base de modelo trapezoidal y multiplicamos por un factor de 1.6 las cotas correspondientes, ya que sabemos que son modelos geoméricamente semejantes.

SECCIÓN	RADIO LOCAL	CUERDA	ANGULO BETA	FACTOR	RADIO LOCAL	CUERDA	ANGULO BETA
1	15	16,79	14,5	1,66	24,9	27,8714	14,5
2	20	16,08	13,6	1,66	33,2	26,6928	13,6
3	25	15,37	12,7	1,66	41,5	25,5142	12,7
4	30	14,66	11,8	1,66	49,8	24,3356	11,8
5	35	13,95	10,9	1,66	58,1	23,157	10,9
6	40	13,24	9,9	1,66	66,4	21,9784	9,9
7	45	12,53	9,1	1,66	74,7	20,7998	9,1
8	50	11,82	8,2	1,66	83	19,6212	8,2
9	55	11,11	7,3	1,66	91,3	18,4426	7,3
10	60	10,4	6,3	1,66	99,6	17,264	6,3
11	65	9,69	5,4	1,66	107,9	16,0854	5,4
12	70	8,98	4,5	1,66	116,2	14,9068	4,5
13	75	8,27	3,6	1,66	124,5	13,7282	3,6
14	80	7,56	2,7	1,66	132,8	12,5496	2,7
15	85	6,85	1,8	1,66	141,1	11,371	1,8

Quedando como resultado del diseño CAD el siguiente;







PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE LOS ÁLABES

Para el proceso de construcción se emplean las mismas cuadernas y se realizan en aluminio



Luego se van colocando sobre una madera con la forma del intradós (parte inferior del álabes), y se colocan por toda la sección entre un corcho de alta densidad que servirá para dar la forma definitiva del álabes;



Siendo esta la forma definitiva del álabe realizado en fibra de vidrio;

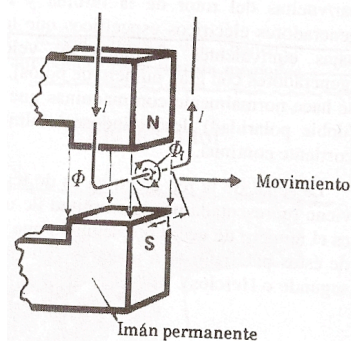


En la parte trasera de la misma foto se puede observar la tapa del rotor de palas.

GENERADOR ELÉCTRICO

El aerogenerador que estamos diseñando es para trabajar en condiciones de aislamiento, lo cual hace que el estudio sea mas complejo que los aerogeneradores conectados a la red eléctrica. La razón fundamental estriba en que en estos últimos, la red es para ellos una fuente de potencia infinita, lo que hace que la misma red establezca la velocidad de rotación de las máquinas que usan generadores asíncronos. Nuestro generador va a ser un generador síncrono por razones que expondremos mas adelante.

El principio de funcionamiento de los generadores se basa en la relación que se establece entre corriente y campo magnético. Si por un hilo conductor se hace pasar una corriente eléctrica, en sus inmediaciones se crea un campo magnético concéntrico respecto al eje del conductor. A la cantidad de líneas se llama “flujo magnético”. Si se desea aumentar el flujo magnético, se puede aumentar la corriente o aumentar la longitud del hilo conductor. Una forma de aumentar la longitud del hilo conductor, es arrollarlo formando varias espiras (**bobinado**). Cuando se hace pasar una corriente por la bobina, esta se comporta como un imán permanente.



El campo magnético sale del polo norte y entra por el polo sur. El aire es un mal conductor magnético, pero si introducimos un material ferromagnético (hierro, acero...) en el interior de la bobina, aumenta la magnitud del campo magnético.

Esto puede parecer interesante para nuestro sistema, pero tiene un problema, y es que los imanes se verían atraídos por los núcleos de las bobinas. Esto resultaría en un parado de la máquina eólica, creando un par de arranque demasiado elevado y un funcionamiento irregular, por lo tanto desechamos esta opción.

Para la elección del aerogenerador tenemos dos posibilidades: generadores asíncronos y generadores síncronos.

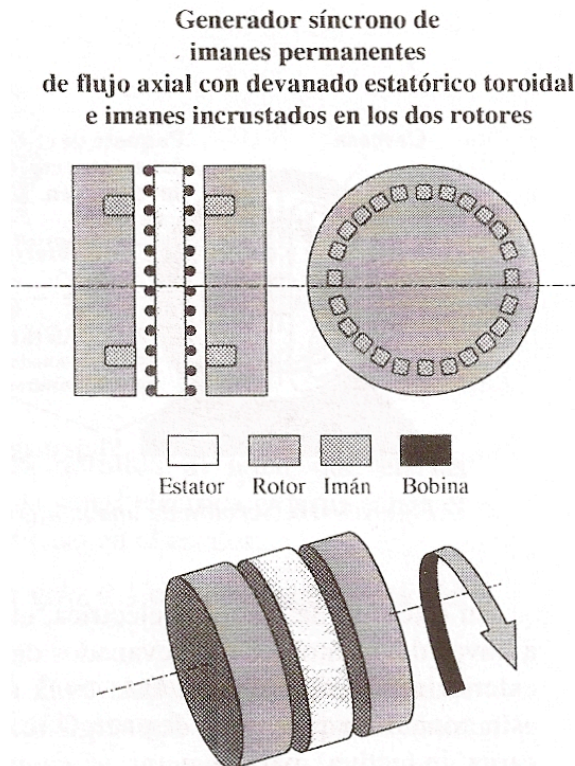
Los generadores asíncronos se usan frecuentemente en aerogeneradores de gran tamaño, ya que tienen velocidades de sincronismo bastante elevadas y requieren del uso de cajas multiplicadoras para realizar el sincronismo. Esto hace que desechemos esta solución, ya que esto haría mas pesado y con mayor mantenimiento y problemas a nuestro aerogenerador.

En un generador síncrono, si mantenemos los conductores o espiras en reposo (**estator**) y hacemos que sea el campo magnético el que experimente un movimiento giratorio relativo respecto al conductor, mediante el giro de un rotor con múltiples polos, obtenidos estos mediante imanes permanentes, se produce una fuerza electromotriz inducida en los conductores que están en reposo, cuya amplitud depende

del nivel de corriente de excitación y su frecuencia de la velocidad mecánica de giro del rotor.

En nuestro caso, el eje del rotor de las palas está solidariamente unido al eje del rotor del generador, lo que nos obliga a diseñar el rotor del generador con muchos polos, para que la velocidad de sincronismo no sea demasiado elevada.

En nuestro caso usaremos un **generador síncrono de imanes permanentes de flujo axial con devanado estatístico toroidal e imanes incrustados en los dos rotores**



Para la elección de los materiales para sintetizar los imanes tenemos las siguientes;

Tipos de materiales	Símbolo	Remanencia (Gauss)	Pr. Energía BH max (MGOe)	Densidad (g/cm ³)	Tmax °C
Alnico	Al	6500-12500	5	7.3	425
Ferrita	Fe	2000-4000	3.7	5	250
Neodimio-Hierro-Boro	NdFeB	10500-11500	35	7.5	80-150
Samario-Cobalto	Sa-Co	9000-10500	28	8.3	250

Siendo los de Neodimio-Hierro-Boro los que mejores características magnéticas tienen.

Estos tienen un comportamiento frente a la temperatura peor en comparación con el resto de materiales, pero lo mejoraremos adecuando la velocidad de sincronismo del ambos rotores evitando que se calienten demasiado.

El problema que nos vamos a encontrar en estos generadores es que la tensión de salida depende únicamente de la velocidad de giro del rotor, al no poder variar la corriente de excitación del circuito inductor. Esto es, para una determinada velocidad de rotación el generador se saturará.

Los imanes girarán frente a las bobinas que componen los distintos polos e inducirán una fuerza electromotriz de frecuencia variable. El imán tenderá a alinearse con el polo, evitando cualquier variación de posición. El cambio de alineación entre polo e imán provocará un par senoidal que depende de la geometría y de las propiedades del material. Este par se llama “**reluctancia**”, y es un par no deseado.

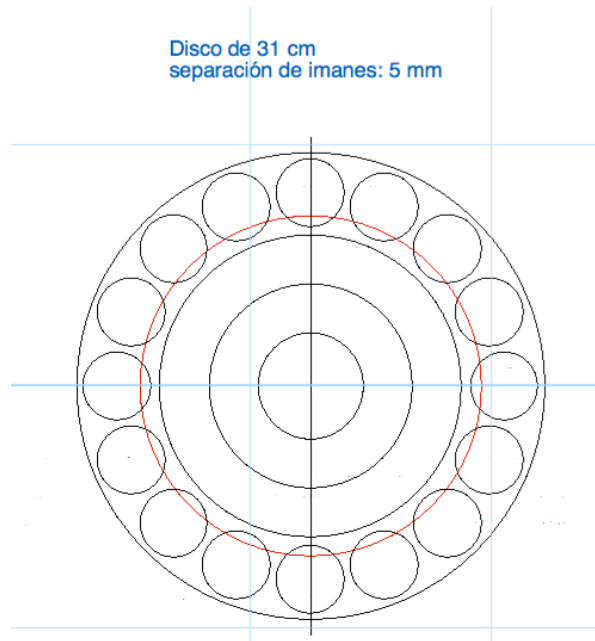
En nuestro diseño, para evitar la reluctancia, dispondremos mas imanes que polos, de tal manera que los imanes no estén todos alineados con los polos, ya que de esta forma generarían una suma de reluctancias los que supondría un par de frenado elevado, con la consecuente pérdida de energía.

PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL GENERADOR

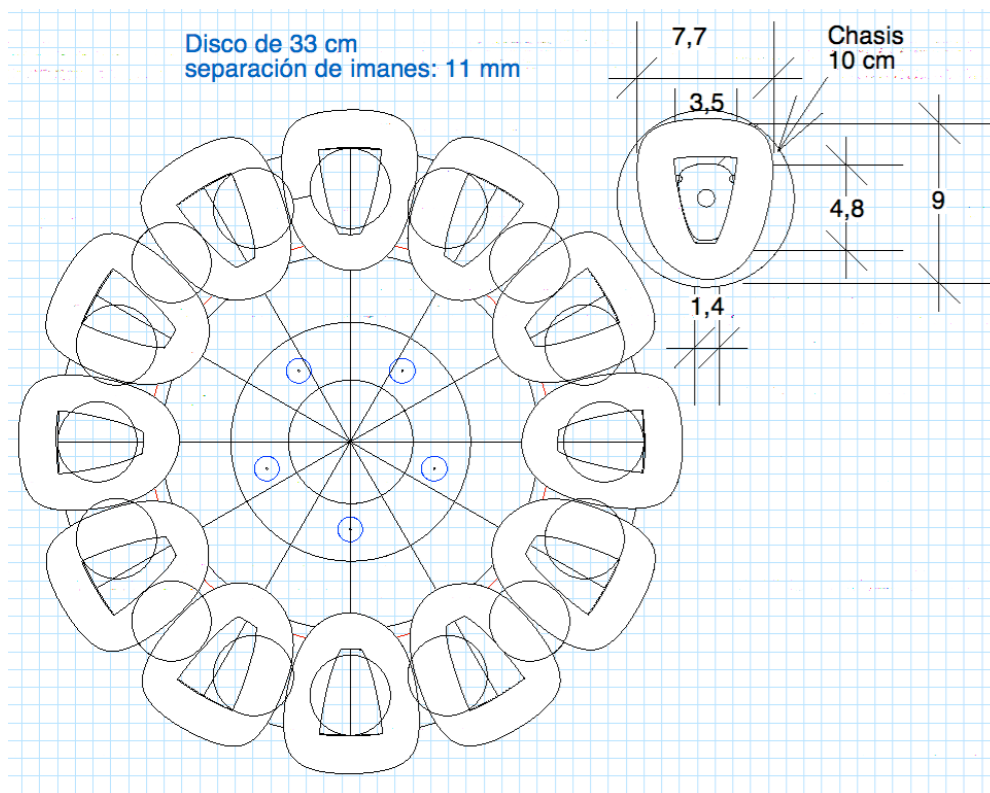
La etapa de diseño comienza por saber el campo magnético que tenemos de cada imán, su disposición en el rotor de imanes y el número de bobinas que tenemos.

El número de bobinas escogido son 12 dispuestas en 3 series de cuatro bobinas conectadas en estrella. Esto es, 4 bobinas en serie y las tres series de 4 en estrella. La elección de la configuración en estrella se debe a que esta configuración es más ventajosa cuando nos movemos en revoluciones relativamente bajas (menores de 700 rpm).

El número de imanes es 16 dispuestos geométricamente de tal manera que en cada instante de giro del rotor, cada bobina de cada una de las 3 series de 4 esté recibiendo exactamente el mismo campo magnético. El disco de imanes quedó de la siguiente manera;



Y una vista en alzado del disco de imanes junto con las bobinas;



En esta figura podemos observar lo dicho anteriormente. Los imanes se sitúan en cada una de las tres fases en la misma posición geométrica en todas y cada una de las 4 bobinas que componen cada fase.

El proceso de construcción fue el siguiente. El disco de los rotores es de acero para facilitar el paso del flujo magnético (*se realizó en corte con laser con una máquina CAD/CAM*), para las bobinas se diseñó y realizó una bobinadora construida con un taladro, un eje y un regulador de tensión para controlar la velocidad de giro del taladro.



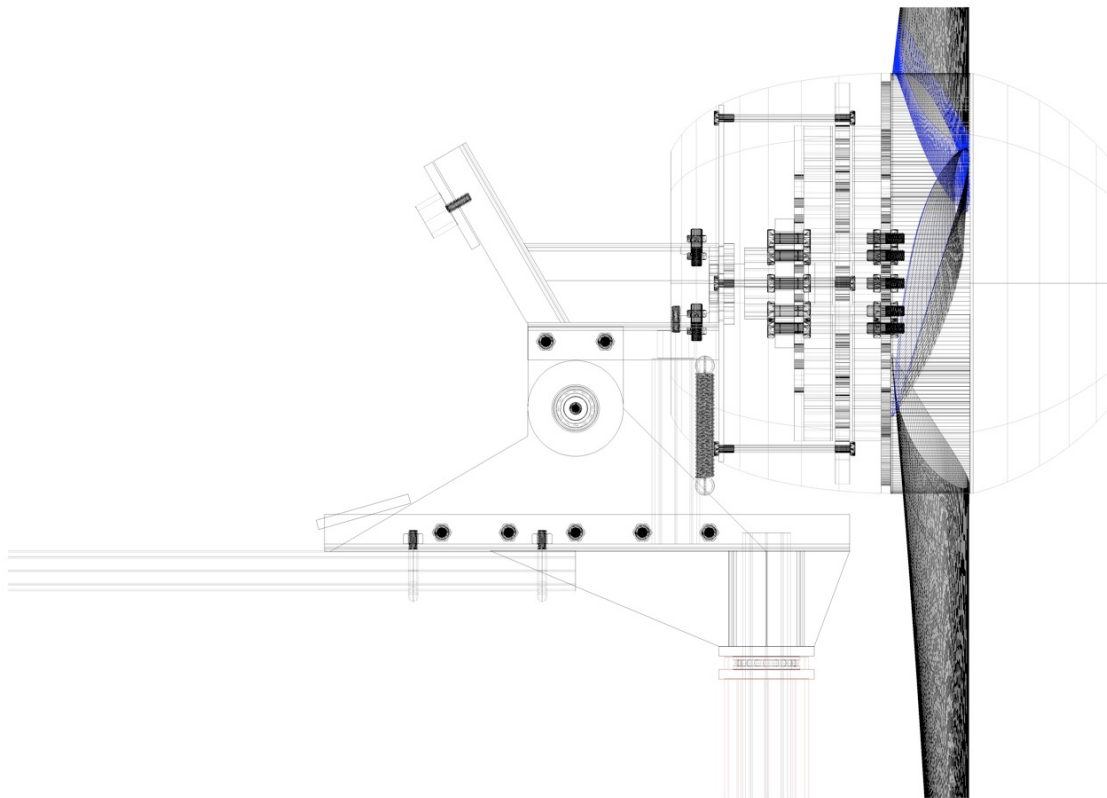
Para la construcción de cada bobina se utilizó hilo de cobre para bobinar de 1.75mm de diámetro (#14 AWG). Con la geometría elegida y la carga de 24V, los cálculos eran de 65 vueltas de hilo para cada bobina.

BASE DEL AEROGENERADOR

Todos los elementos del conjunto que forma la base están realizados en acero y con coeficientes generosos en cuanto a solicitaciones de carga para no tener problemas de solicitaciones de carga que atenten contra el aerogenerador.

El sistema de desorientación es por pérdida de captación del flujo de aire en horizontal, mediante un sistema que llegados a un punto máximo de viento se desorienta, volviendo el mismo a su posición original.

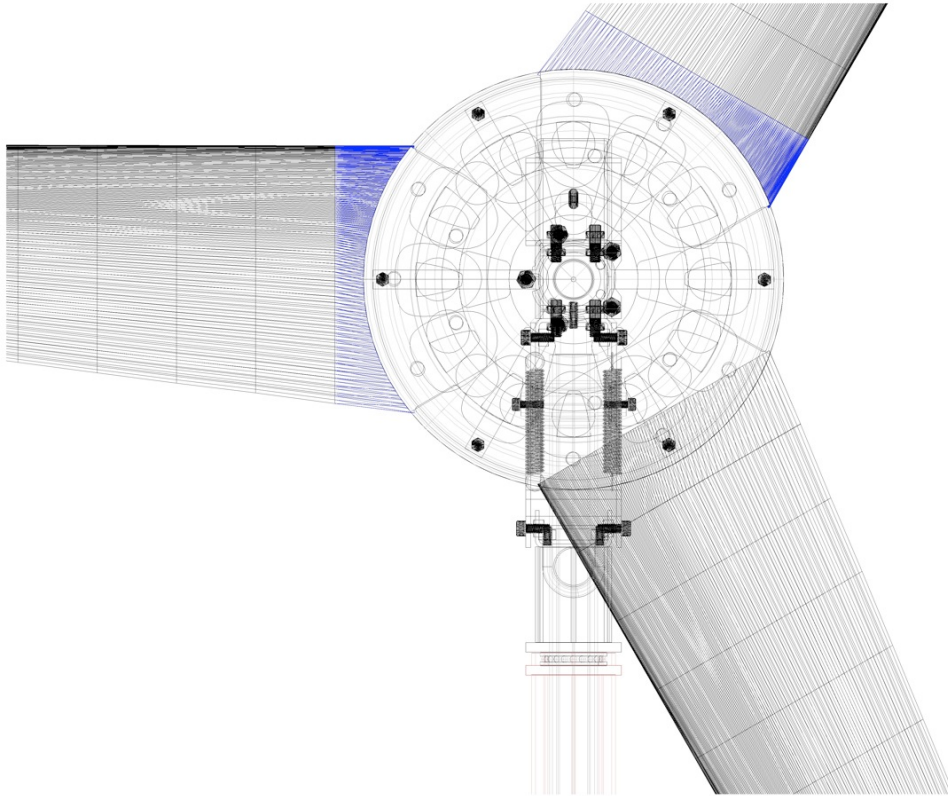
Para el sistema de movimiento libre sobre la torre la elección del sistema fue el siguiente; una barra unida solidariamente a la base del aerogenerador que gira libremente sobre la torre, siendo esta misma una barra de diámetro mayor. Los diámetros escogidos son comerciales para mayor simplicidad y economía y la barra interior se rectificó con un torno. El sistema de giro se realizó mediante dos rodamientos, uno axial en la parte superior capaz de soportar toda la carga del aerogenerador y otro rígido a bolas de dos hileras para la parte mas baja del sistema de giro. Podemos ver el montaje del sistema en CAD;



En la figura anterior podemos observar el conjunto de todos los elementos principales del aerogenerador;

- I. Álabes. Unidos solidariamente al rotor de imanes exterior
- II. Rotor de imanes exterior e interior
- III. Estator. Quedando en el interior de los dos rotores de imanes
- IV. Base. En la misma observamos el sistema de giro del rotor

Una vista en alzado para mas detalle;



Y el sistema completo en 3D;



MONTAJE foto

Aquí podemos observar foto a foto el proceso de construcción del aerogenerador. Las piezas que se ven en azul están zincadas para evitar corrosión y el resto del aerogenerador está pintado con una pintura de protección de color blanco.





Como nota final me gustaría destacar la gran ayuda prestada por mi coordinador de proyecto D. Juan Carlos García-Prada a quien le agradezco su constante ayuda en el transcurso del proyecto y del programa erasmus, desde aquí, gracias.

RIEPILOGO

SOMMARIO

1. GLOSSARIO

2. INTRODUZIONE

- 2.1. Obiettivi del progetto
- 2.2. Portata del progetto

3. ENERGÍA EOLICA E AEROGENERATORI

- 3.1. Energia eolica
 - 3.1.1. Provenienza dell'energia eolica
 - 3.1.3. Variazione del vento /Legge di betz
 - 3.1.3. Selezione dell'ubicazione
 - 3.1.3.1 Rugosità
 - 3.1.3.2 Ostacoli
 - 3.1.3.3 Effetti acceleratori
- 3.2. Aerogeneratori
 - 3.2.1. Parti dell'aerogeneratore
 - 3.2.2. Funzionamento di un aerogeneratore
 - 3.2.3. Classificazione degli aerogeneratori

4. DEFINIZIONE DELLE PRESTAZIONI

- 4.1. Studio previo alla selezione della potenza
 - 4.1.1. Studio energetico della casa
 - 4.1.2. Studio eolico
- 4.2. Selezione della potenza dell'aerogeneratore
- 4.3. Ragioni per scegliere una turbina più piccola

5. PROGETTO DEGLI ORGANI DELL'AEROGENERATORE

- 5.1. Dispositivo d'orientazione
- 5.2. Trasmissione della potenza
 - 5.2.1. Boccola
 - 5.2.2. Cuscinetti
 - 5.2.3. Asse orizzontale
 - 5.2.4. Unione del rotore dell'alternatore con l'asse orizzontale
- 5.3. Gondola
- 5.4. Unione torre-gondola
 - 5.4.1. Cuscinetti
 - 5.4.2. Asse verticale
 - 5.4.3. Supporto cuscinetti
- 5.5. Generatori
- 5.6. Sistema di frenaggio
- 5.7. Pale
- 5.8. Torre

6. MONTAGGIO

7. MANUTENZIONE

8. ANALISI ECONOMICA

- 8.1. Preventivo di un progetto microeolico
- 8.2. Studio di redditività
 - 8.2.1. Calcolo del costo di generazione dell'energia
 - 8.2.2. Calcolo del periodo di ritorno dell'inversione

9. ANALISI AMBIENTALE

- 9.1. Fase di pianificazione e progetto
- 9.2. Fase di costruzione
- 9.3. Fase operativa
 - 9.3.1. Avifauna
 - 9.3.2. Impatto visuale
 - 9.3.3. Impatto derivato dal rumore
 - 9.3.4. Impatto derivato dalle ombre

10. COMPARAZIONE MICRO/MACROEOLICA

11. PROSPETTIVE DEL MICROEOLICO

CONCLUSIONI

BIBLIOGRAFIA

1. Glossario

C_p: coefficiente di potenza
P: potenza minima
F: coefficiente di simultaneità
E: energia
g: densità dell'aria
A: area scopata per le pale
D: diametro del rotore
v: velocità del vento **h**: altezza
b: coefficiente di livello di rugosità del terreno
a: velocità specifica dell'aerogeneratore
k (rad/s): velocità di rotazione del rotore **n**, min -1,: velocità di rotazione del rotore
FC: fattore di capacità dell'aerogeneratore
TIR: tasso interna di rendimento
r: tasso di interesse
n: vita utile dell'installazione
Com: costi di operazione e mantenimento
CC: costo di capitale
I: investimento
?,M: pari
L: larghezza del profilo di pala
V: angolo di incidenza
W: angolo di inclinazione
j: angolo di sostentamento
CY,CX: coefficienti adimensionales di resistenza all'avanzamento e sostentamento
SIG.: relazione di velocità
SP: parametro di forma **m**: massa
N: coefficiente di solidità
b: coefficiente di sfregamento
c: coefficiente di Poisson
E: modulo di Young
h,i: tensioni
F: forza
Re: limite elastico
Rm: limite plastico

2. Introduzione

L'obiettivo principale del presente lavoro di tesi è la verifica del possibile sviluppo dell'energia eolica per fini civili, reso interessante oggi, sia dal punto di vista economico, sia come soluzione tecnologica per quei Paesi con mancanza d'infrastrutture di trasporto d'energia elettrica. In tale lavoro verranno esposti i principali passi per la progettazione di un aerogeneratore di bassa potenza per la fornitura di energia elettrica ad una civile abitazione isolata dalla rete, tenendo in conto le necessità energetiche della stessa.

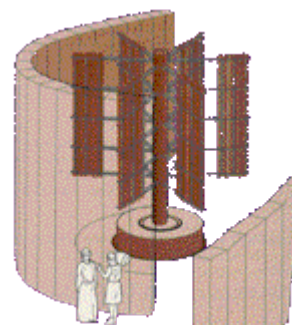
Lo studio verrà incentrato, prevalentemente, sul design della gondola e della torre, stimando varie alternative per ogni componente. Si realizzerà anche uno studio dei parametri di design per la pala e la torre, calcolando gli sforzi sostenuti e commentando le soluzioni adottate. (dati ricavati da per CIEMAT [Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas], Ministero di Scienza e Tecnologia della Spagna)

Infine si effettuerà lo studio di impatto ambientale e quello relativo alla fattibilità economica dell'ipotesi progettuale scelta.

3. Energia eolica ed aerogeneratori

Tra le fonti rinnovabili derivanti dal Sole, l'energia posseduta dal vento è stata la prima ad essere stata utilizzata dall'uomo sotto forma di energia meccanica. A parte il suo utilizzo nella navigazione a vela che risale al tempo degli egiziani, i primi mulini a vento comparvero nelle aree considerate la culla della civiltà: Mesopotamia, Cina, Egitto. Si tramanda che, già nel 17° secolo

A.C., Hammurabi, il Re di Babilonia avesse progettato di irrigare la pianura mesopotamica per mezzo di mulini a vento; essi erano probabilmente costituiti da un sistema ruotante attorno ad un asse verticale. La differenza tra le due applicazioni è sostanziale: nel caso della navigazione si sfrutta la spinta esercitata dal vento su una superficie resistente; nel caso dell'irrigazione va invece realizzato un vero e proprio motore alimentato ad energia eolica che aziona una macchina operatrice, la pompa idraulica.



Disegno di una antica turbina

La certezza storica sull'uso dei mulini a vento come macchine di uso corrente risale comunque al 7° secolo D.C., nel regno del califfo Omar I. Per trovarli in Europa occorre invece aspettare al Medioevo, al tempo delle crociate; questi erano del tutto diversi, di maggiori dimensioni e ad asse orizzontale, tecnologicamente più complessi e con rendimenti più elevati. Il miglioramento fu dovuto alle scoperte sulla dinamica delle vele navali: ci si accorse che sfruttando la portanza (la forza utile perpendicolare alla velocità del vento), anziché la resistenza, si poteva ottenere una quantità maggiore di energia. L'uso di queste macchine si ebbe per le applicazioni più svariate, dal pompaggio dell'acqua, alla macinazione dei cereali, alla spremitura delle olive, alle industrie manifatturiere (della carta, del tabacco, del legno).



Mulino cretese



Mulino olandese

Nel secolo scorso conobbero uno sviluppo davvero eccezionale: a metà del 1800 in Olanda se ne contavano 9000 esemplari in funzione; tra il 1880 ed il 1930, solo negli Stati Uniti, ne furono installati milioni di unità per usi agricoli e domestici, e molte di queste macchine funzionano ancora. È in questo periodo che nacquero i primi generatori di energia elettrica, con la costruzione nel 1887-88 a Cleveland (Ohio) del primo impianto eolico ad opera dell'americano Charles F. Brush iniziò la produzione di elettricità sfruttando il vento, gli aerogeneratori avevano potenza variabile fra i 3 ed i 30 kW. Successivamente, con la realizzazione di aerogeneratori di potenze crescenti (dai 50 kW ai 4500 kW dei più grandi di oggi) si giunse alla costruzione di macchine tecnologicamente evolute, ad asse orizzontale e basso numero di pale (da 1 a 3) con sezione a profilo alare, ed in alcuni paesi, come la Danimarca, si arrivò a soddisfare una consistente parte del fabbisogno nazionale di energia elettrica.



3.1. Energia eolica

L'energia eolica come tutte le fonti d'energia rinnovabili eccetto la maremotrice e la geotermica, proviene dal sole. La Terra riceve $1,74 \cdot 10^{17}$ W di potenza del Sole ed attorno ad un 2 % di questa energia è convertita in energia eolica.

3.1.1. Provenienza dell'energia eolica

L'energia eolica è associata all'energia cinetica del vento. La circolazione del vento si deve alla differenza di temperature delle zone che si trovano nell'equatore a 0° di latitudine con le zone ubicate più lontane di questo. L'aria calda è più leggera del freddo, per cui salirà fino a raggiungere un'altezza approssimata di 10 km estendendosi verso il nord e sud.

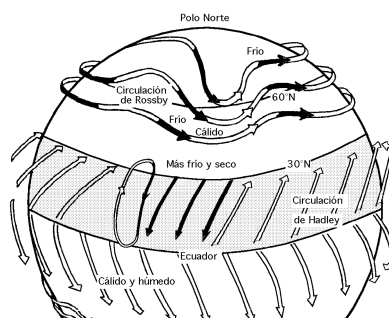


Fig. 3.1.1. Venti globali

Attorno ai 30° di latitudine si trova una zona di minori pressioni per cui l'aria comincerà a discendere attratta dalla zona di bassa pressione ubicata nell'equatore. In generale, il vento soffia dalle zone di alta pressione a quelle di bassa pressione, modificando la sua direzione in funzione della rotazione del pianeta, verso la destra nell'emisfero Nord e verso la sinistra nel Sud.

Questi venti sono detti venti geostrofici o venti globali e sono influenzati poco dalla superficie terrestre. Oltre a questa tipologia, ne esistono altri come i venti locali, tra i quali rilevanti risultano i venti di superficie, i quali sono frenati dalla rugosità della Terra e dagli ostacoli. Bisogna anche menzionare la brezza marina, corrente che si genera per il gradiente di temperature che nasce tra il giorno e la notte tra il mare e la terra; durante il giorno la brezza soffia dal mare alla terra mentre durante la notte la direzione del vento si inverte. Infine va menzionata l'importanza dei venti di montagna causati dal riscaldamento dell'aria prossima ai pendii e dal conseguente suo innalzamento verso la cima dovuto alla diminuzione della densità e, come nel caso precedente, durante la notte la direzione del vento si inverte.

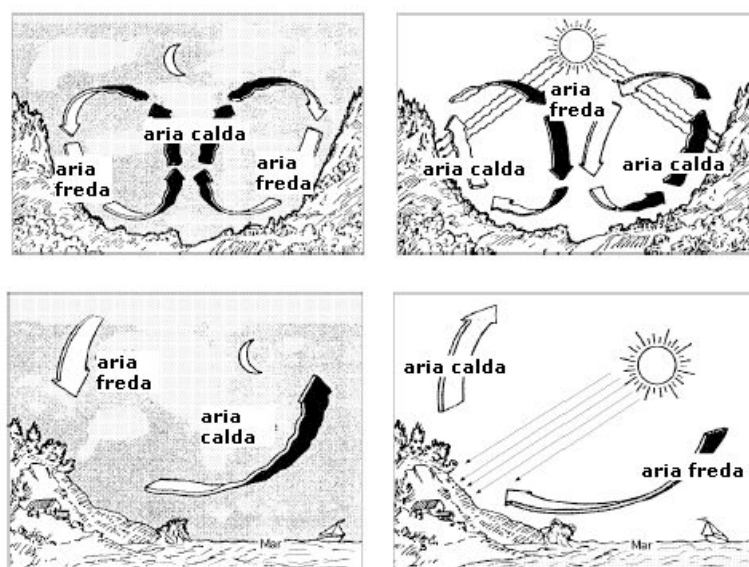


Fig. 3.1.2. Venti di valle e montagna

Quando si effettua uno studio di producibilità eolica della zona occorre tenere in conto quali tipologie di venti locali esistono, il cui effetto si somma a quello dei venti globali.

3.1.2. Variazione del vento

Per l'industria eolica è molto importante essere capace di descrivere la variazione della velocità del vento. Esso costituisce, infatti, un dato importante per i progettisti per ottimizzare il design degli aerogeneratori e potere minimizzare i suoi costi. Un modello utilizzato per descrivere la variazione del vento in una posizione data è la Distribuzione di Weibull.

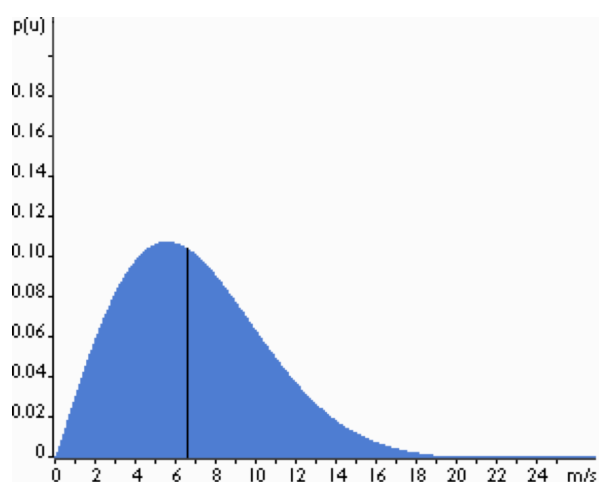


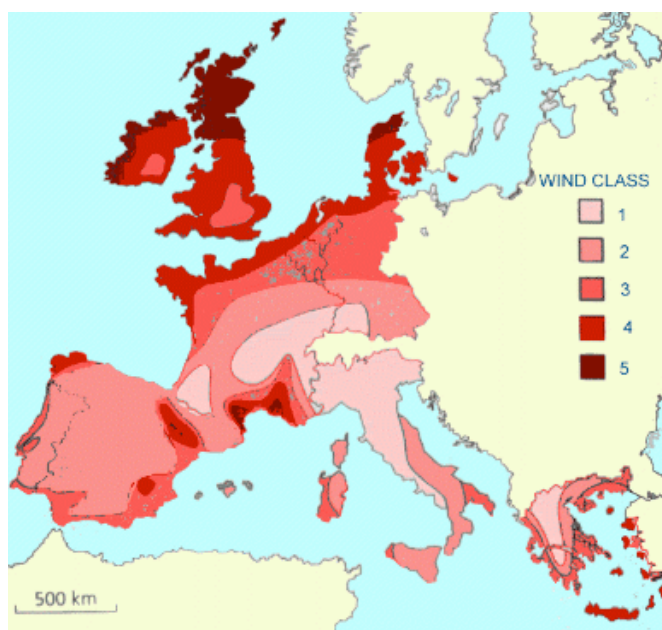
Fig. 3.1. Distribuzione di Weibull [1]

Il grafico della Fig. 3.1 mostra una distribuzione di probabilità. L'area sotto la curva vale esattamente 1, poiché la probabilità che il vento soffi a chiunque delle velocità, includendo lo zero, deve essere del 100 %. La distribuzione di Weibull indica che la probabilità che soffi il vento a bassa velocità è più alta rispetto alle alte velocità; se si misurano le velocità del vento durante un anno può osservarsi che nella maggioranza di aree i forti uragani sono rari, mentre i venti freschi e moderati sono abbastanza comuni. La distribuzione statistica delle velocità del vento varia da un posto ad un altro del globo, dipendendo dalle condizioni climatiche locali, del paesaggio e della sua superficie.

Per questo motivo, al momento di progettare un aerogeneratore non basta considerare i dati delle velocità ed utilizzare la sola velocità media per i calcoli; bisogna ponderare la probabilità d'ogni velocità del vento con la corrispondente quantità di potenza che è capace di estrarre a quella velocità.

3.1.3. Selezione dell'ubicazione

Al momento di selezionare un'ubicazione corretta per installare un aerogeneratore non è sufficiente fare uno studio di producibilità basandosi su mappe eoliche né utilizzare i soli dati di misura ottenuti nel posto.



CLASSI DI POTENZA MEDIA DEL VENTO IN EUROPA (watts/mq)
 1(<50) 2(50-100) 3(100-150) 4 (150-250) 5(>250)

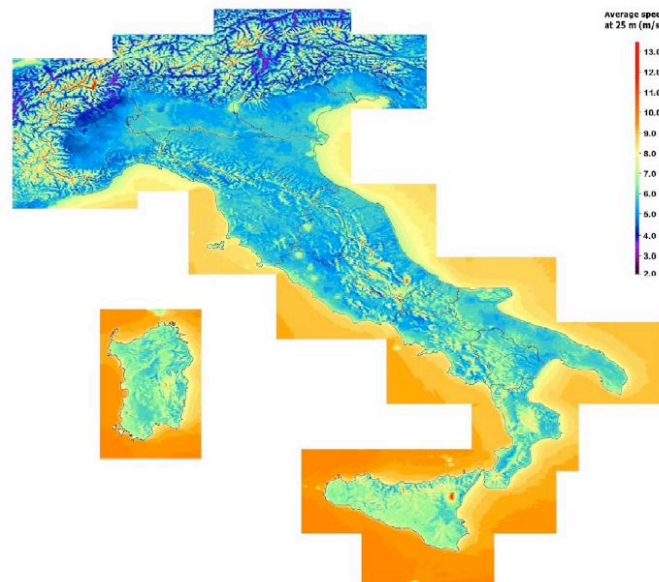


Fig.3.1.3.Mappa eolico Eruopa/Italia

Le velocità del vento tendono a diminuire per l'attrito con la superficie terrestre. In generale quanto più pronunciata è la rugosità del terreno, maggiore sarà il rallentamento della velocità del vento. Un'alta rugosità di classe 3 o 4 si riferisce ad un paesaggio con molti alberi ed edifici, mentre alla superficie del mare gli corrisponde una rugosità di classe 0.

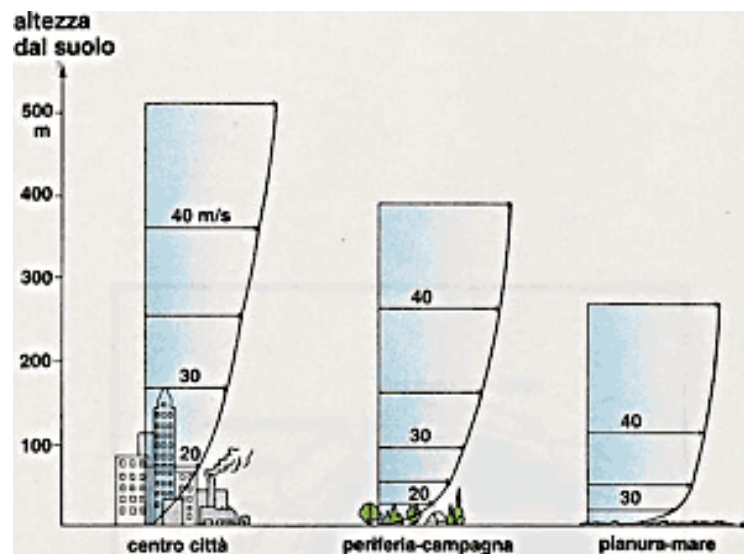


Fig. 3.1.1.Profilo dell'aria secondo la rugosità

Le turbolenze diminuiscono la possibilità di utilizzare l'energia del vento di forma effettiva in un aerogeneratore. Le turbolenze producono maggiori rotture ed usure in la turbina eolica.

Gli ostacoli che trova il vento tali come edifici, alberi, formazioni rocciose, etc. possono diminuire la velocità del vento di forma significativa e spesso creano turbolenze intorno ad essi. Perciò è sempre consigliabile evitare grandi ostacoli vicino a turbine eoliche. Ogni aerogeneratore crea un ostacolo nella direzione nella quale soffia il vento, questo si conosce come effetto torre. In realtà, si crea dietro la turbina, una lunga coda di vento

turbolenta e rallentata. Per questo nei parchi eolici per evitare questo effetto, deve mantenersi una distanza minima tra turbine.

Un altro effetto a considerare è l'effetto tunnel che consiste in situare l'aerogeneratore in un passo stretto tra montagne. Di questa maniera l'aria si comprime nella parte della montagna che è esposta al vento e la sua velocità aumenta considerevolmente.

Un'altra posizione utile per il posizionamento degli aerogeneratori è in collina, dove si riesce ad apprezzare velocità di venti superiori che nelle zone circostanti.

E' importante ubicare gli aerogeneratori nella direzione dei venti dominanti, con minimi ostacoli ed una rugosità più bassa possibile in quella direzione, tenendo in conto effetti colline e tunnel.

3.2. Aerogeneratori

Gli aerogeneratori sono le macchine che s'incaricano di catturare l'energia del vento e trasformarla in energia elettrica. Nei seguenti sottoparagrafi si descrive di forma riassunta che elementi costituiscono un aerogeneratore, il principio di funzionamento dello stesso e la sua classificazione.

3.2.1. Parti di un aerogeneratore

In questo sottoparagrafo si descrive di forma breve gli elementi più importanti degli aerogeneratori: le pale, la boccola, la squadra moltiplicatore di potenza, gli assi di dimissione e bassa velocità, il generatore, il controllore elettronico e la torre. Nella Figura 3. 2. si mostra un disegno di un aerogeneratore dettagliando come è ogni parte.

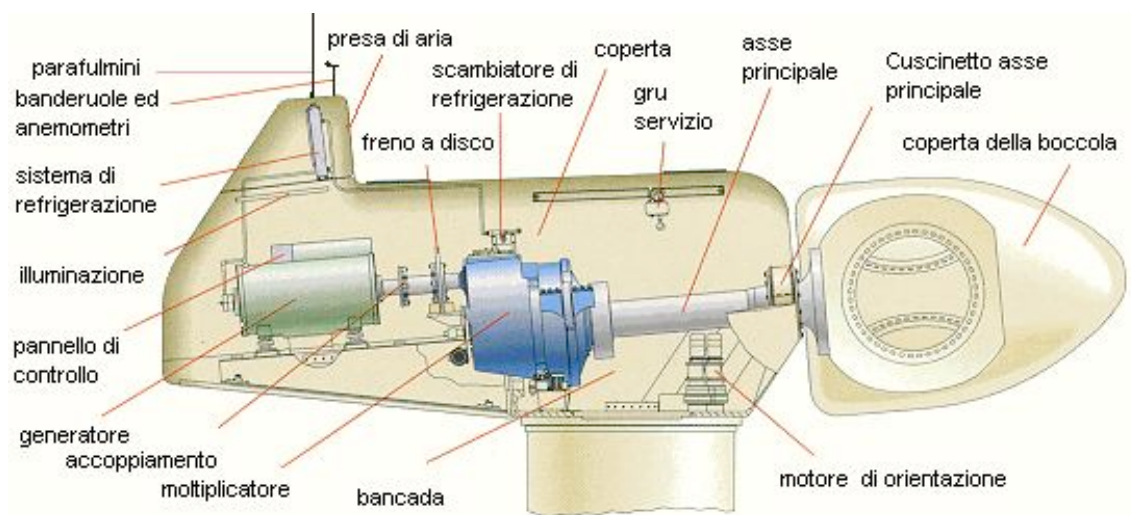


Fig. 3. 2. Parti di un aerogeneratore

Le pale sono gli elementi dell'aerogeneratore che catturano l'energia cinetica del vento. Tutte le pale dell'aerogeneratore si uniscono di forma solidale ad un supporto denominato boccola o cubo.

La boccola è l'elemento che realizza l'unione di tutte le pale dell'aerogeneratore. La boccola si monta sull'asse di bassa velocità, dal quale si trasmette la coppia motrice attraverso l'albero di trasmissione dell'aerogeneratore, al moltiplicatore di giri.

La squadra che permette la moltiplicazione di velocità, adattando l'asse di bassa velocità all'asse ad alta velocità dove si accoppia il generatore riceve il nome di moltiplicatore.

Gli assi sono gli elementi di trasmissione che accoppiano il moltiplicatore con le pale (asse di bassa velocità) ed il moltiplicatore col generatore (asse ad alta velocità). L'asse d'alta velocità è equipaggiata con un freno a disco meccanico d'emergenza. Il freno meccanico si usa in caso di guasto del freno aerodinamico, o durante i lavori di mantenimento della turbina.

Il generatore è costituito da una macchina elettrica incaricata di trasformare l'energia meccanica di rotazione in energia elettrica. La macchina elettrica è composta di un rotore (parte da bollo che genera un campo magnetico variabile girando i pale), ed uno statore (parte fissa sulla quale si genera la corrente elettrica indotta).

Eccezionalmente, alcuni aerogeneratori incorporano un controllore elettronico che ha un computer che continuamente fa vedere le condizioni dell'aerogeneratore e che controlla il meccanismo d'orientazione e la posizione delle pale come dirige i freni. Questo è il caso d'aerogeneratori di grandi potenze, come quelli utilizzati nei parchi eolici.

Il telaio o gondola è la struttura nella quale si montano i distinti membri dell'aerogeneratore. Nella gondola si montano la boccola, il moltiplicatore di velocità, gli assi e il generatore.

Finalmente la torre è l'elemento che sostiene tutto l'insieme dell'aerogeneratore unisce al suolo.

3.2.2. Funzionamento di un aerogeneratore

La quantità d'energia trasferita al rotore per il vento dipende dalla densità dell'aria, dell'area spazzata dalle pale e, ovviamente, dalla velocità del vento.

L'energia cinetica di un corpo in movimento è proporzionale alla sua massa, per cui, l'energia cinetica del vento dipende dalla densità dell'aria. A pressione atmosferica normale ed a 15°C la densità dell'aria è 1,255 kg/m³, benché questo valore diminuisce leggermente con l'aumento dell'umidità.

Con riferimento all'area spazzata dalle pale, questa determina quanta energia del vento è capace di catturare l'aerogeneratore. Ad un maggiore diametro delle pale, la superficie è maggiore e pertanto l'energia che assorbe il rotore è maggiore.

La velocità del vento è un parametro molto importante per la quantità d'energia che un aerogeneratore può trasformare in elettricità. Ad una maggiore velocità del vento, l'energia che capta l'aerogeneratore è maggiore.

41..

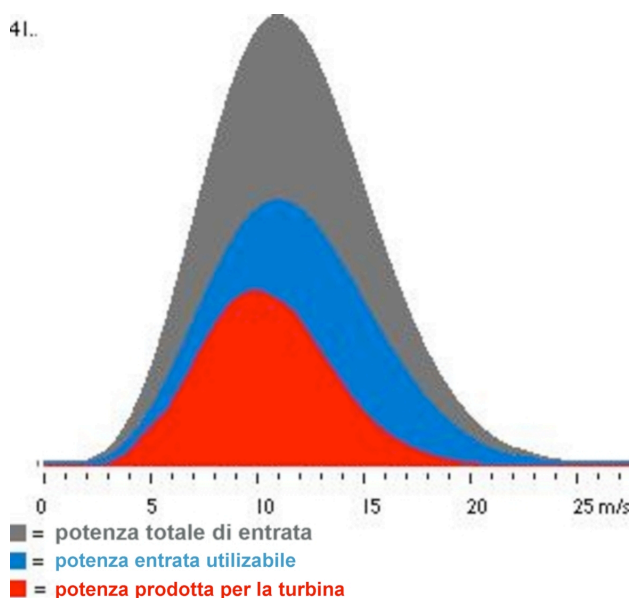


Fig. 3.2.1. Potenza prodotta per la turbina

L'energia cinetica del vento è catturata per gli aerogeneratori grazie alle pale del rotore. Quando il vento incide contro le pale, queste girano intorno all'asse del rotore e pertanto fanno girare l'asse di bassa velocità la quale è accoppiata alla boccola. Questo grazie al moltiplicatore fa girare ad alta velocità l'asse al quale è accoppiato il generatore che è il produttore d'energia elettrica.

Il sostentamento delle pale è una forza perpendicolare alla direzione del vento ed è prodotto dalla differenza di pressioni ad entrambi i lati della pala, vale a dire, grazie al fatto che l'aria che scivola durante la superficie superiore dell'ala si muove più rapidamente che quello della superficie inferiore. Se l'inclinazione delle pale è molto elevata può prodursi il fenomeno conosciuto come perdita di sostentamento, nel quale il flusso d'aria della superficie superiore smette di stare in contatto con la superficie dell'ala e pertanto le pale smettono di girare. È per questo motivo che le pale degli aerogeneratori sono incurvate al fine di avere un angolo d'attacco ottimale durante tutta la longitudine della stessa e che non si produca detto fenomeno.

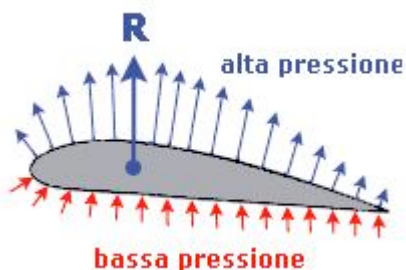


Fig. 3.2.2. Sostentamento

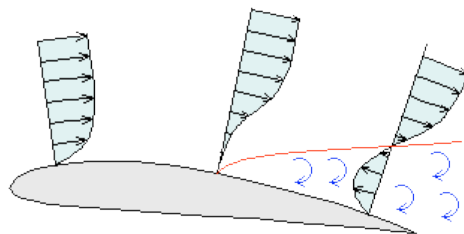


Fig. 3.2.3. Perdita di sostentamento

Come tutte le macchine trasformatrici d'energia, gli aerogeneratori non sono capaci di trasformare tutta l'energia eolica disponibile del vento in energia meccanica e pertanto bisogna tenere in conto un rendimento denominato coefficiente di potenza C_p . Il

coefficiente di potenza è la relazione che c'è tra la potenza eolica dell'ubicazione, e la potenza meccanica che si ottiene. Questo coefficiente dipende dalla velocità del vento (vedere Fig. 3.3). A bassa velocità il rendimento dell'aerogeneratore è maggiore che ad alte.

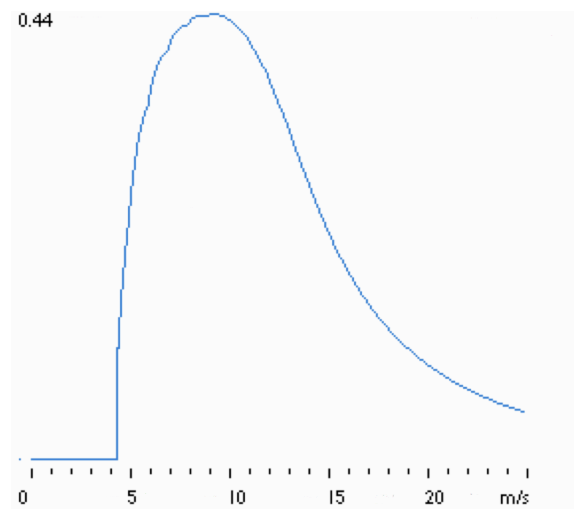


Fig. 3.3. Coefficiente di potenza [1]

D'uguale forma che il coefficiente di potenza, la potenza di un aerogeneratore è variabile con la velocità del vento (vedere fig. 3.4). Questo si vede nelle curve di potenza degli aerogeneratori, i quali mostrano la potenza elettrica disponibile in un aerogeneratore a differenti velocità.

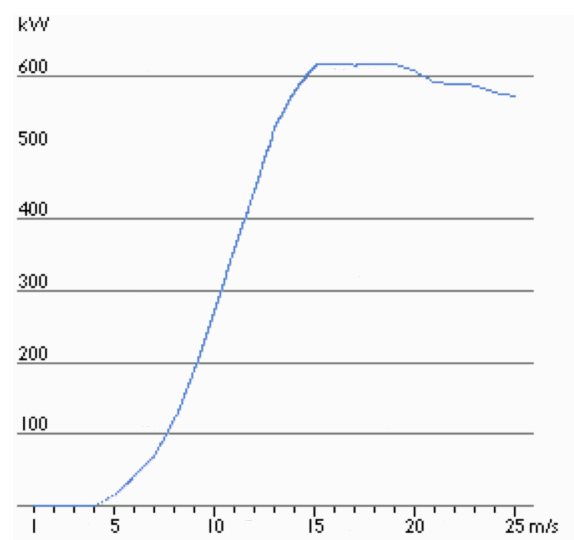


Fig. 3.4. Potenza di un aerogeneratore [1]

3.2.3. Classificazione degli aerogeneratori

Una prima classificazione d'aerogeneratori si basa sulla posizione del suo asse principale. Esistono due tipi d'aerogeneratori: quelli d'asse orizzontale e quelli d'asse verticale.

Gli aerogeneratori d'asse orizzontale necessitano di un sistema di controllo dell'orientamento al vento, (normalmente un piccolo motore elettrico per aerogeneratori di più di 50 kW). Gli elementi di connessione, moltiplicatore e generatore, si sentono alloggiati all'altezza del rotore nella gondola situato nella parte alta della torre. In questo tipo d'aerogeneratori le pale possono stare in sopravvento, situate di fronte al vento, oppure in sottovento, situate dietro il vento. Il vantaggio di possedere le pale in sopravvento è che evita l'effetto torre, ma il suo svantaggio è che il rotore deve essere il più rigido possibile. D'altra parte, se le pale sono situate in sottovento, il flusso del vento si distorce per entrare in contatto con la gondola prima di incidere sulle pale. Negli aerogeneratori con pale situate in sottovento si producono fluttuazioni della potenza eolica, le quali possono creare carichi di fatica.

Un'altra possibile classificazione degli aerogeneratori ad asse orizzontale è in funzione del numero di pale (vedere Fig. 3.5 e Fig. 3.6).



Fig. 3.5. Aerogeneratore di 3 pale [1]

Le prime sono denominate turbine rapide e generalmente sono bipale o tripale; il numero di pale non influisce direttamente sulla potenza ottenuta, la quale è invece funzione della superficie spazzata dalle pale.

Invece, i generatori multipale sono composte da multiple placche metalliche di profilo non aerodinamico e possiedono una coppia d'avviamento proporzionale al numero di pale ed al diametro. Questi ultime si usano in applicazioni meccaniche di bassa potenza, come per esempio il pompaggio dell'acqua.



Fig. 3.6. Turbina multipala [1]

Gli aerogeneratori d'asse verticale hanno il vantaggio fondamentale che captano il vento in qualunque direzione, per cui non hanno bisogno del sistema di controllo dell'orientamento., hanno una maggiore semplicità ed una riduzione di costi nel montaggio. Tuttavia possiedono un'efficienza peggiore che gli aerogeneratori d'asse orizzontale. Nella Fig. 3.6.1 e Fig.3.6.2.si mostrano aerogeneratori d'asse verticale, **Rotore Darrieux**, e **rotore Savonius**.



Fig. 3.6.1. Rotore Darrieux [1]



Fig.3.6.2.rotore Savonius

Nella Fig. 3.7 può vedersi un paragone di rendimenti di vari tipi d'aerogeneratori d'asse verticale e d'asse orizzontale. Si vede che quelli d'asse orizzontale (bipala e tripala, possiedono maggiori rendimenti che tutti gli altri, perfino che quelli d'asse orizzontale multipala. Come si è commentato prima può osservarsi che gli aerogeneratori d'asse verticale come il **rotore Savonius** o il **rotore Darrieux** possiedono un rendimento più basso di quelli di asse orizzontale.

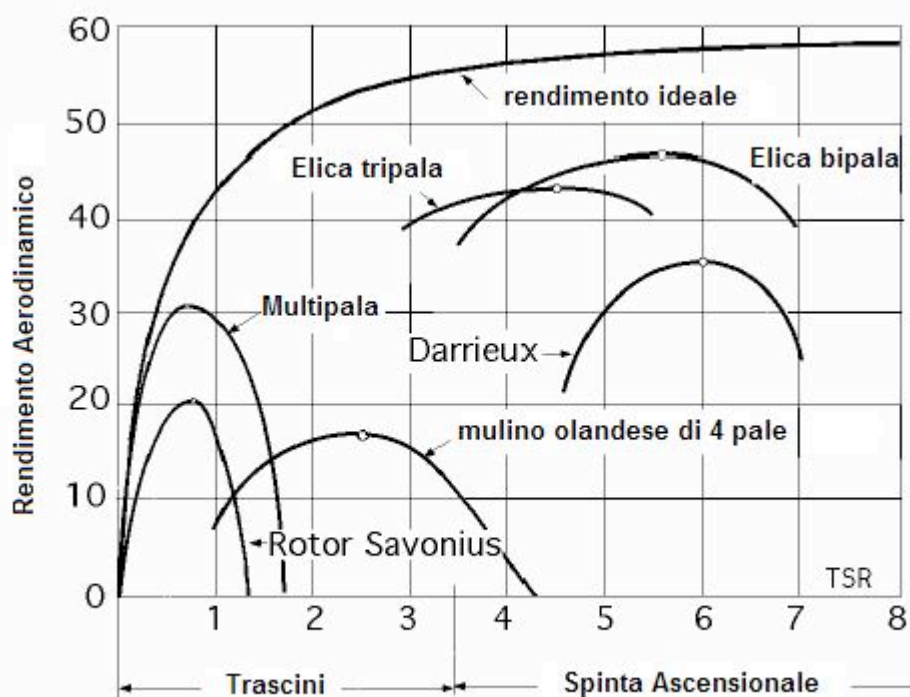
Fig 3.7 .- Curve (η_{aerod} - TSR)

Fig. 3.7 Rendimento aerodinamico di vari tipi d'aerogeneratori [1]

4. Definizione delle prestazioni

In questo capitolo si definisce la potenza dell'aerogeneratore, installabile in un dato sito per l'alimentazione di una casa isolata, definendo la collocazione e la velocità del vento. Prima di realizzare detti studi bisogna commentare che l'aerogeneratore oggetto di progetto sarà una macchina d'asse orizzontale con rotore a sopravvento (dati proporzionati per CIEMAT [Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas], Ministero di Scienza e Tecnologia della Spagna) poiché possiede una maggiore efficienza che le macchine d'asse verticale.

4.1. Studio previo alla selezione della potenza.

Per potere definire le prestazioni dell'aerogeneratore è necessario studiare la potenza elettrica necessaria della casa alla che fornisce d'elettricità e la potenza eolica della zona dove si ubichi questo.

4.1.1. Studio energetico della casa

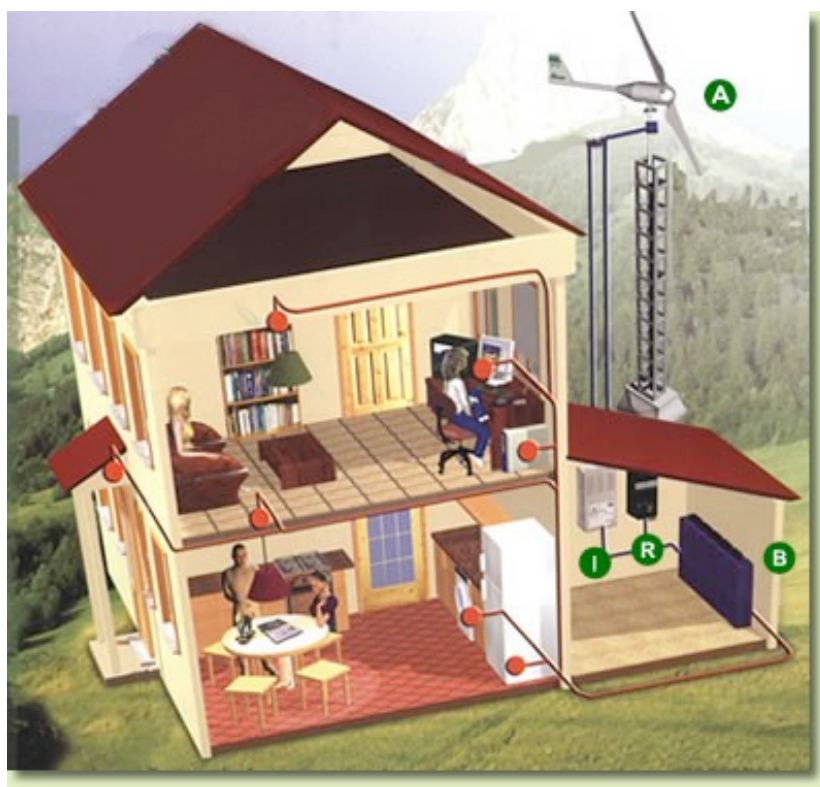


Fig. 4.1.1. Casa esempio di studio

Lo studio della potenza elettrica consiste nel sommare le potenze consumate da tutti gli apparati elettrici della casa, ma poiché non saranno connessi tutti gli apparati contemporaneamente, bisogna ponderare questo valore per un coefficiente di simultaneità F . A continuazione si mostra nella Tavola 4.1 la lista di tutti gli apparati

elettrici e dell'illuminazione dettagliando la potenza che consumano e le ore che si stima che stiano connessi. Conoscendo la potenza che consumano ed il tempo mezzo che stano collegati per giorno si calcola nella stessa tavola l'energia mezza consumata per ogni uno di loro.

Machina	Potenza (W)	Ore consumo (h/g)	Totale (W.h/g)
Frigorifero	250	24	6000
Frullatore	300	0,25	75
Lavatrice	2500	0,25	625
Tostapane	400	0,25	100
Microonde	600	0,5	300
Televisione	95	3	285
DVD	75	1	75
Hi-fi	85	1	85
Ferro di stiro	1200	0,5	600
Aspirapolvere	900	0,25	225
Aria Condizionato	1100	0,5	550
Computer	200	0,9	180
ILLUMINAZIONE	Potenza (W)	Ore consumo (h/g)	Totale (W.h/g)
cucina	150	2,5	375
Bagno 1	100	1,5	150
Bagno 2	100	0,75	75
Stanza 1	150	1	150
Stanza 2	100	1,5	150
Stanza 3	100	0,25	25
Salone	200	5	1000
Corridoio	100	0,5	50
anticamera	80	0,25	20
Totale	8135		10095

Tavola4. 1. Studio della potenza elettrica, potenza installata.

Come si è menzionato prima la potenza che consumano tutti gli apparati o potenza installata non corrisponde con la potenza minima che deve essere capace di somministrare l'aerogeneratore. Secondo la (4.1) la potenza minima è la potenza elettrica totale ponderata per un coefficiente di simultaneità F. Si stima un coefficiente di simultaneità del 50 %, cioè, come massimo si consuma il 50 % della potenza installata.

$$P_{\text{minima}} = F \cdot P_{\text{installata}} = 0,5 \cdot 8135 = 4,1 \text{ kW} \quad (4.1)$$

4.1.2. Studio eolico

Una volta nota la potenza elettrica da installare è necessario valutare la producibilità del sito.

La potenza eolica di una zona si risolve mediante la (4.2) [2,3] e questa dipende della densità dell'aria, della velocità del vento e dell'area scoperta per le pale.

$$P_{eolica} = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \quad (4.2)$$

La zona dove supporremo si posizionerà l'aerogeneratore si tratta del municipio di Los Molinos situato in la regione di Madrid. Questo ci servirà per fare una stima della velocità del vento. In tabella 4.2 [4] si dettagliano i dati relativi alle velocità medie mensili e la media annuale, relativi all'anno 2007 per il "Servicio Meteorológico de Madrid" (dati dosati a 10 metri di altezza sul livello del suolo).

Mese	Vm (m/s)
Gennaio	6,9
Febbraio	9,1
Marzo	9,3
Aprile	9,5
Maggio	9,1
Giugno	7,4
Luglio	9,2
Agosto	8,2
Settembre	10,7
Ottobre	8,1
Novembre	10,2
Dicembre	7,9
Media ANNUALE	8,8

Tavola4. 2. Velocità medie mensili in Los Molinos

Ma poiché la variazione di velocità dipende dal terreno e dell'altezza alla che si prenda, bisogna correggere la velocità media calcolata [3] secondo la:

$$v_{h2} = v_{h1} \cdot \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^b \quad (4.3)$$

dove v_{h1}, v_{h2} rappresenta le velocità dei venti alle altezze h_1 e h_2 , e b è un coefficiente che dipende dal livello di rugosità del terreno. In tabella 4.3 [3] si dettagliano differenti valori del coefficiente b in funzione di distinti tipi di terreno.

Livello di rugosità del terreno	b
Non rugoso(insabbia, nevichi, mare)	0,10-0,13
Poco rugoso(erba, campo di cereali)	0,13-0,20
Rugoso (bosco, casa piccole)	0,20-0,27
Molto rugoso(edifici grandi)	0,27-0,40

Tabella 4. 3. Livelli di rugosità del terreno [3]

Perciò, supponendo che il rotore dell'aerogeneratore sarà situato a 8 m d'altezza (valore medio per una casa unifamiliare) e che la zona dove si ubicherà è poco rugosa ($b=0,16$), la velocità corretta è quella mostrata nell'Ec4. 4.

$$v_{8m} = v_{10m} \times \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{0,16} = 8,8 \left(\frac{8}{10} \right)^{0,16} = 8,5 \text{ m / s} \quad (4.4)$$

Come detto nel capitolo precedente, il vento segue una distribuzione di Weibull ma in questo caso per semplificare i calcoli si suppone che la velocità del vento si distribuisce secondo l'istogramma di carico della Fig. 4.1, supponendo che l'aerogeneratore lavora 10,5 ore ai giorni ripartite tale e come si mostra di seguito:

- 2,5 ore a 4m/s
- 7 ore a 8,5 m/s
- 1 ore a 14 m/s

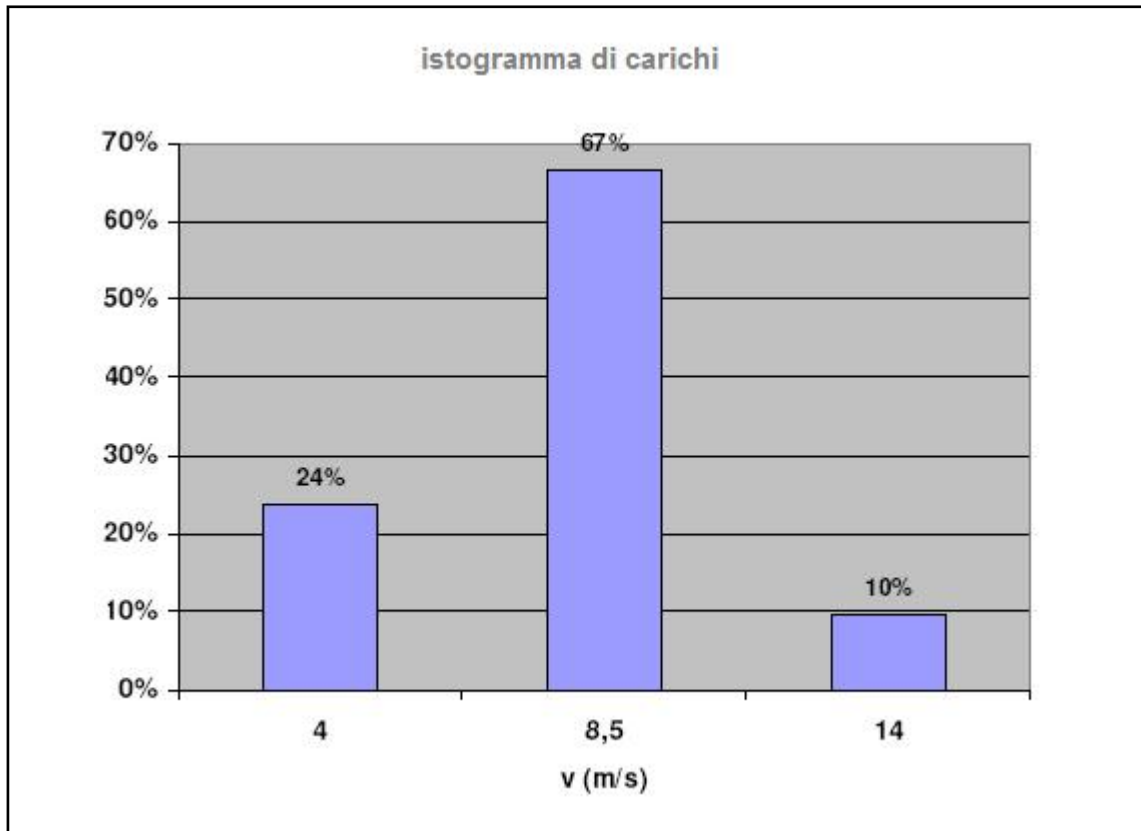


Fig. 4.1. Istogramma di carichi

Conoscendo l'istogramma di carichi si calcola la velocità ponderata secondo la sua probabilità in Eq. 4.5.

$$v_{ponderada} = 4 \times 0,24 + 8,5 \times 0,67 + 14 \times 0,1 = 8,1 \text{ m/s} \quad (4.5)$$

Prendendo una velocità di 8,1 m/s ed una densità dell'aria di 1,255 kg/m³ (può variare con l'altezza e l'umidità), l'unico fattore variabile al fine di raggiungere la potenza elettrica richiesta per la casa, è il diametro dell'area di spazzata delle pale. Nella Tabella 4.4 si mostrano valori di potenze eoliche ricavabili in funzione di distinti valori di diametri d'area spazzata per le pale.

D (m)	Peolica(kW)
1	0,25
2	1,01
4	4,035
6	9,085
8	16,15
10	25,24

Tabella 4.4. Potenza eolica [2]

I risultati della Tabella 4.4 non si riferiscono a potenza elettrica se non a potenza eolica, per questo motivo bisogna correggere questi risultati secondo la (4.5) supponendo un coefficiente di potenza di 0,55 (il massimo teorico che può ottenersi secondo la Legge di Betz è $C_p=0,59$, cioè, Secondo la legge di Betz il massimo ideale che si può ottenere con un aerogeneratore è un 59 % della potenza del vento).[1][3]

Supponendo che la velocità media nell'area del rotore è la somma della velocità v_1 (velocità nella parte frontale dell'aerogeneratore; vedere Fig. 4.2) e v_2 (velocità nella parte posteriore dell'aerogeneratore; vedere Fig. 4.2) sapendo che la potenza del vento P estratto per il rotore è uguale alla massa per la differenza dei quadrati della velocità del vento e riferendo questa con la potenza del vento senza passare per l'aerogeneratore P_o la Legge di Betz dimostra la:

$$\left(\frac{P}{P_o}\right) = \left(\frac{1}{2}\right) \times \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right) \times \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \quad (4.6)$$

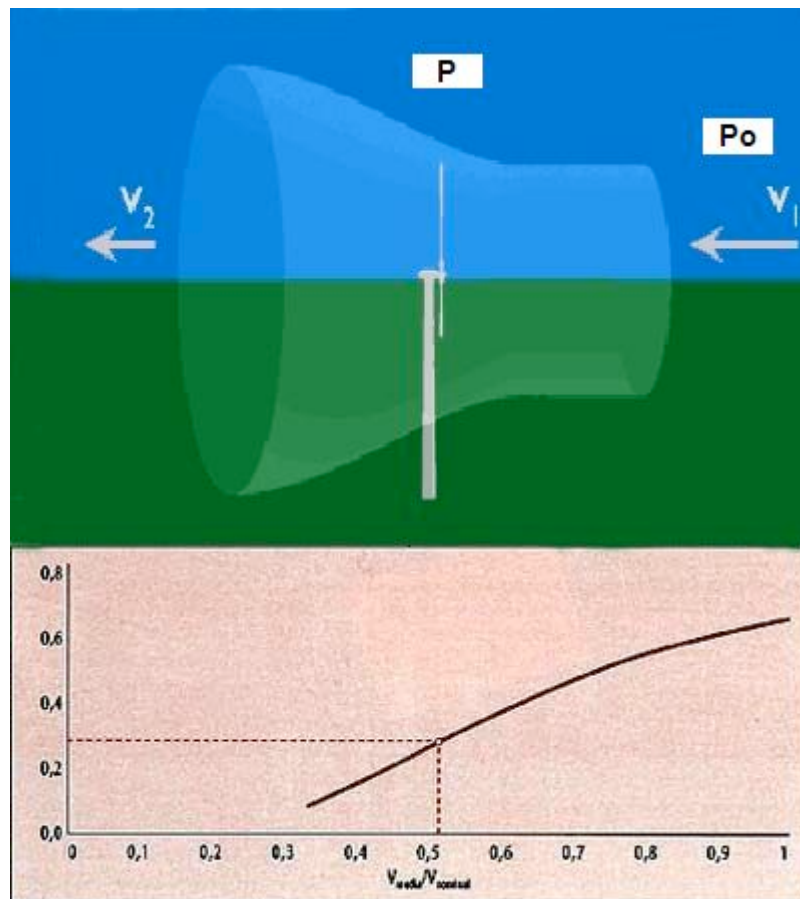


Fig 4.2.1 fattore di utilizzo come funzione di V_m/V_{nom}

Fig. 4.2. Variazione del vento al passo per l'aerogeneratore [1]

Se si interpreta la (4.6) in funzione di v_2/v_1 , si osserva nella Fig. 4.3 che la funzione raggiunge il suo massimo per la relazione $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$

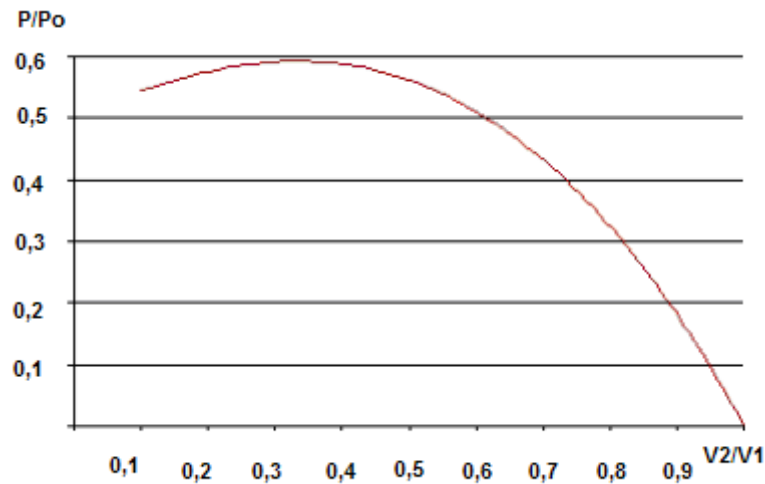


Fig. 4.3. P/Po in funzione di V2/V1 [1]

Sostituendo il valore ottimo di v_2/v_1 in Eq. 4.6, si ottiene che la relazione tra potenze eoliche prima dell'aerogeneratore e nella superficie di spazzata delle pale di 0,59 (vedere Eq. 4.7). In altre parole, l'aerogeneratore può utilizzare al massimo il 59 % dell'energia eolica disponibile.

$$\left(\frac{P}{P_o}\right) = \left(\frac{1}{2}\right) \times \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right) \times \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) = \frac{16}{27} = 0,59$$

Dopo avere spiegato brevemente consiste la Legge di Betz , si continua con il calcolo della potenza elettrica della Tavola 4. 4. per ciò si suppone un rendimento del sistema elettrico del 0,95. Nella relazione seguente si mostrano l'espressione per trasformare la potenza eolica a potenza elettrica.

$$P_{elettrica} = \eta_{sistema.elettrico} \times P_{meccanica} = \eta_{sistema.elettrico} \times C_p \times P_{eolica} \quad (4.8)$$

Nella Tabella 4.5 si mostrano le potenze massime elettriche che è capace di somministrare un aerogeneratore per distinti diametri d'area di spazzata delle pale.

D(m)	Pelettrica(kW)
1	0,13
2	0,51
4	2,02
6	4,55

8	8,08
10	12,62

Tabella 4.5. potenza elettrica

4.2. Selezione della potenza dell'aerogeneratore.

Alla presenza dei calcoli corretti della Tabella 4.5 il diametro dell'area spazzata per le pale ottimo per quest'applicazione è di 6 m, poiché con questo si ottiene la potenza elettrica minima. Ma può stringersi ancora più la potenza dell'aerogeneratore tenendo in conto che la domanda d'elettricità della casa non è sempre la potenza minima calcolata nell'eq. 4.1. Una soluzione molto vantaggiosa sarebbe utilizzare un sistema di accumulo (batterie), poiché il volume dell'aerogeneratore può ridursi ancora più. Come si vedrà più avanti, si seleziona un alternatore, per ciò è necessario installare all'uscita di questo un raddrizzatore di corrente (un convertitore di corrente alterna a corrente continua) per potere caricare le batterie. All'uscita delle batterie bisogna installare un ondulatore che converte la corrente continua in alterna.

Il consumo totale d'energia per di giorno è (Tabella 4.1) di 10095 W·h/gg e pertanto, le batterie devono essere capaci di somministrare questo valore. Ma bisogna tenere in conto che a questo valore bisogna sommarlo il consumo d'energia del sistema elettrico che si stima nel 10 % del consumo totale d'energia (secondo CIEMAT).

Supponendo che ogni giorno il vento soffia alla velocità ponderata (calcolata in Ec4.5) per 10,5 ore, e sapendo il consumo energetico per giorno della casa (calcolato in Tavola 4), si calcola, in Eq. 4.9, la **potenza minima elettrica** dell'aerogeneratore.

$$P_{\text{elettrica} - \text{aerogeneratore}} = \frac{1,1 \times 10095 \text{ W} \cdot \text{h} / \text{g}}{10,5 \text{ h} / \text{g}} = 1057,6 \text{ W} \quad (4.9)$$

Per calcolare il volume dell'aerogeneratore (diametro pale) nella Tabella 4.6 si è calcolato la potenza eolica (calcolata secondo Eq. 4.2) e la potenza elettrica (calcolata secondo Eq. 4.8) per distinti valori di diametri.

Diametro pale (m)	Potenza eolica (W)	Potenza elettrica(W)
0,5	72	43
1	289	171
1,5	651	384
2	1158	683
2,5	1809	1067
3	2605	1537
3,5	3545	2092
4	4630	2732

4,5	5860	3458
5	7235	4269
5,5	8754	5165
6	10418	6147
6,5	12227	7214
7	14181	8367
7,5	16279	9604
8	18522	10928

Tabella 4.6. Diametro/Potenze

Si è selezionato come diametro finale delle pale dell'aerogeneratore 2,5 m, poiché la potenza elettrica ricavabile si adatta abbastanza bene alla potenza minima che dovrebbe avere l'aerogeneratore (4.9).

Per controllare che il diametro di rotore selezionato sia corretto, bisogna verificare che la velocità nella punta della pala non sia superiore alla velocità del suono, poiché altrimenti il design delle pale non sarebbe ottimo poiché potrebbero prodursi gli effetti di "cavitazione sulla punta della pala", cosa che implicherebbe perdita di rendimento, rumore, vibrazioni ed erosione. Questo possiamo calcolarlo anche di seguito nell'Eq. 4.10 si realizza detto calcolo di accertamento. Per realizzare questo calcolo è necessario sapere a che velocità gira il rotore; come si vedrà nel Capitolo 5, si seleziona l'alternatore 145 STK6M che gira ad una velocità di 390 rpm per una velocità di vento di 8 m/s.

$$v_{pp} = \omega \times r = n \times \frac{2\pi}{60} \times r = 390 \times \frac{2\pi}{60} \times 1,25 = 51,2 \text{ m/s} < 340 \text{ m/s} \quad (4.10)$$

Per concludere si risolve il numero di pale che compongono il aerogeneratore. Per ciò è necessario sapere la velocità specifica, la quale si definisce secondo l'Eq. 4.11, come la relazione tra la velocità nella punta della pala v_{pp} , e la velocità ponderata del vento v [2].

$$\lambda = \frac{v_{pp}}{v} = \frac{\omega \times r}{v} = \frac{n \times \frac{2\pi}{60}}{v} = \frac{390 \times \frac{2\pi}{60}}{8,1} = 6,02 \quad (4.11)$$

Il numero ottimo di pale è funzione della velocità specifica come mostra la Tavola 4.7.

λ	N° Pale
1	6+20
2	4+12
3	3+8
4	3+5

5+8	2+4
5+15	1+2

Tabella 4.7. Numero di pale [2]

Poiché la velocità specifica λ ha un valore di 6,02 il numero di pale ottimo varia di 2 fino a 4 pale secondo la Tabella 4.4. per decidere il numero di pale si terrà in conto che a minore numero di pale, il costo è minore ma l'aerogeneratore soffre maggiori carichi poiché gira più veloce. Invece a maggiore numero di pale, benché il costo ed il paio d'avviamento aumentino, i carichi dovuti a fatica sono minori. Finalmente si selezionano due pale considerando che è una soluzione di compromesso tra costo ed i possibili carichi che possa soffrire.

Per finire questo capitolo nella Tavola 4.8 viene mostrato lo studio di capacità dell'aerogeneratore. In questa tavola si mostra la velocità mezza mensile a 8 m d'altezza calcolata secondo Eq. 4.4. In questa tavola si calcola per ogni mese la potenza eolica ricavabile a 4 m/s, alla velocità mezza del vento secondo il mese ed a 14 m/s. E secondo il tempo di funzionamento ad ogni regime di velocità, si calcola i kW·h/gg eolici generati ed i kW·h/gg elettrici che possono estrarsi, supponendo un rendimento $C_p=0,5$. Sapendo che bisogna coprire 10,2 kW·h/gg, si osserva che il sistema è capace di coprire le necessità della casa esempio per ogni mese.

Bisogna risaltare aspetti teorici di questi risultati, poiché si è supposto che:

- La domanda d'elettricità è costante durante tutto l'anno
- Il funzionamento dell'aerogeneratore è di 10,5 ore per giorno
- Un istogramma di carichi per semplificare i calcoli

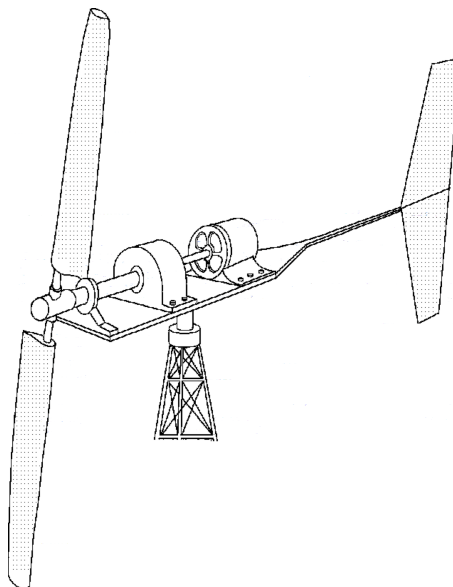
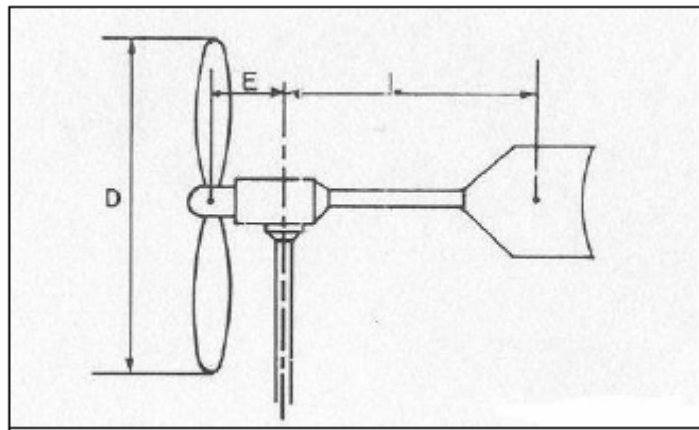
Il sistema non è perfetto al 100 %, poiché è molto difficile predire in ogni momento l'energia eolica ricavabile ed il consumo d'elettricità. Nell'ultima colonna della Tavola 4.8 si mostra il fattore di capacità FC dell'aerogeneratore, fattore che indica la relazione tra energia elettrica che potrebbe generarsi se l'aerogeneratore funzionerà 24 ore il giorno (36,96 kW·h/día) e l'energia elettrica generata reale. Alla presenza dei risultati si osserva che i valori di FC sono molto bassi, dell'ordine del 30 % di calza, a conferma del fatto che non utilizzando il 100 % della capacità dell'aerogeneratore, manifesta che l'energia eolica resta una fonte molto costosa.

Mese	V _m	P _{eolica-4m/s} (kW)	P _{eolica-vm} (kW)	P _{eolica-14m/s} (kW)	E _{eolica}	E _{elettrica}	FC
	(m/s)	2,5h/gg	7 h/gg	1 h/gg	kW·h/gg	kW·h/gg	(%)
Gennaio	6,7	0,75	0,87	6,56	14,51	7,26	35,8%
Febbraio	8,8	0,75	1,99	6,56	22,37	11,19	55,2%
Marzo	9,0	0,75	2,12	6,56	23,31	11,66	57,5%
Aprile	9,2	0,75	2,26	6,56	24,29	12,15	59,9%
Maggio	8,8	0,75	1,99	6,56	22,37	11,19	55,2%
Giugno	7,1	0,75	1,07	6,56	15,93	7,97	39,3%
Luglio	8,9	0,75	2,06	6,56	22,84	11,42	56,3%

Agosto	7,9	0,75	1,46	6,56	18,63	9,32	46,0%
Settembre	10,3	0,75	3,24	6,56	31,09	15,55	76,7%
Ottobre	7,8	0,75	1,40	6,56	18,27	9,13	45,1%
Novembre	9,8	0,75	2,80	6,56	28,06	14,03	69,2%
Dicembre	7,6	0,75	1,30	6,56	17,56	8,78	43,3%
CALZA ANNUALE	8,5	0,8	1,9	6,6	21,60	10,8	53,3%

Tabella 4.8. Studio di capacità del sistema

5. Progetto degli organi dell'aerogeneratore



Nel capitolo precedente è stato scelto un aerogeneratore con asse orizzontale con le pale situata a sopravvento, il numero di pale ed il diametro delle stesse. In questo capitolo si studiano varie alternative di design per ogni componente: il dispositivo di orientazione,

la trasmissione di potenza, la gondola, l'unione torre-gondola, il generatore, il sistema di frenaggio, le pale ed il tipo di torre.

Come si vedrà nei seguenti sottoparagrafi si seleziona un alternatore a magneti permanenti col rotore fissato all'asse orizzontale dell'aerogeneratore, evitando così la moltiplicazione di velocità. L'asse orizzontale si unisce alla gondola mediante un supporto dei cuscinetti. Nell'asse orizzontale si monta la boccola delle pale. Il dispositivo d'orientazione si realizza mediante banderuola che si unisce alla gondola per mezzo di un supporto. L'insieme si unisce alla torre per mezzo di un supporto con cuscinetti che permettono il suo giro. Il sistema di frenaggio che si seleziona va unito all'elezione del tipo di torre, si seleziona una torre ribaltabile che agisca come freno in caso di venti forti.

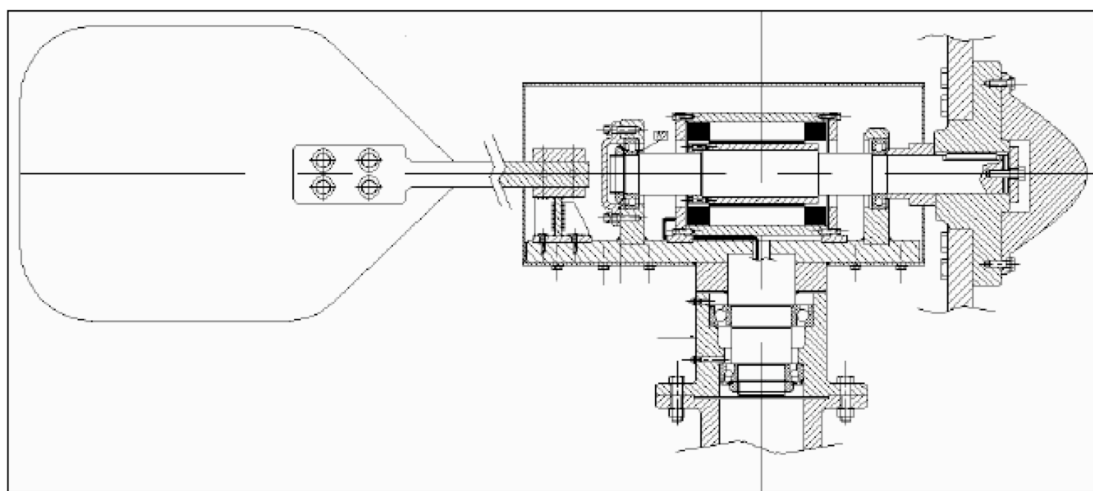


Fig. 5.1. Sezione laterale dell'insieme

5.1. Dispositivo d'orientazione

Il meccanismo d'orientazione di un aerogeneratore è utilizzato per orientare il rotore perpendicolare alla direzione del vento. La turbina eolica ha un errore d'orientazione se il rotore non sta situato perpendicolarmente al vento. Un errore d'orientazione implica che non se sta approfittando di tutta la capacità delle pale per catturare l'energia disponibile. Per risolvere questo è necessario installare questo tipo di dispositivi. Di seguito si dettagliano tre possibili alternative: orientazione mediante pinna stabilizzatore, mediante eolici ausiliari ed orientazione del rotore mediante servomotore. La soluzione con pinna stabilizzatore s'impiega principalmente per l'orientazione d'eolica fino a diametri di 6 m. Questa soluzione consiste in una pinna che si accoppia al rotore dell'eolico come si osserva nella Fig. 5.2 e mantiene il piano di rotazione delle pale perpendicolare al vento. È una soluzione semplice e di basso costo, per quel motivo si usa per aerogeneratori di bassa potenza.

Fig. 5.2. Orientazione mediante pinna stabilizzatore [2]

Nella fig. 5.3 si mostra un dispositivo d'orientazione mediante eolici ausiliari, le quali si dispongono nel lato dell'asse dell'eolica principale i cui assi di rotazione sono perpendicolari all'eolica principale. Se l'eolica principale non è orientata nella direzione del vento, l'eolico sostituto si mette in moto trascinando la vite senza fine fino a che s'ingrani su una corona dentata concentrica con l'asse del supporto. Gli eolici ausiliari si trattengono, quando ricevono il vento perpendicolare alla sua asse. Comparato con la scelta di pinna stabilizzatore, questa soluzione ha il vantaggio d'essere più soave e senza movimenti bruschi ma è più cara e più complicata.

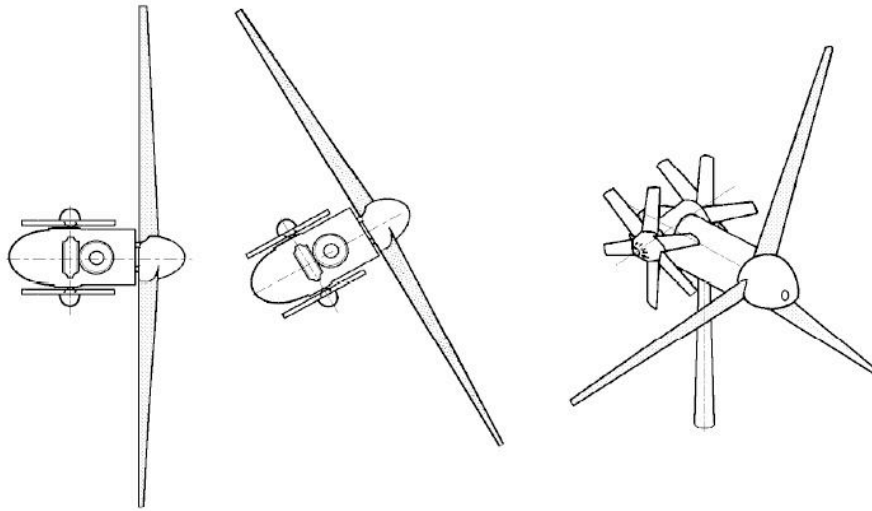


Fig. 5.3. Orientazione mediante eolici ausiliari

Un'ultima possibile alternativa è l'orientazione del rotore dell'eolico per servomotore. Questa soluzione consta di un motore d'orientazione che può girare nei due sensi, il qual è diretto per una banderuola. La banderuola che si trova soggetta alla gondola, prende la direzione del vento e mediante un sistema elettronico corregge la direzione dell'aerogeneratore azionando il motore di orientazione. Nonostante essere una soluzione molto precisa, è molto più cara e più complessa di quelle commentate prima, per quel motivo è utilizzata in aerogeneratori di gran volume.

Perciò stimando il costo delle alternative e la sua complessità in quanto a design per l'applicazione si adotterà una soluzione con pinna stabilizzatore.

Per questo tipo di dispositivo d'orientazione della gondola, diametri di pale minore a 6m, si raccomanda che la distanza tra l'asse di rotazione della gondola e l'ubicazione di la banderuola sia di approssimativamente 4 volte la distanza tra l'asse di rotazione della gondola ed il piano del rotore.[CIEMAT]

La superficie della banderuola dipende dall'area spazzata dalle pale. Nel caso di aerogeneratori bipala la superficie della banderuola (Eq. 5.1.) deve essere il 4 % dell'area spazzata dalle pale.

$$A_{rotore} = \pi \times R^2 = \pi \times 1,25^2 = 4,9m^2$$

$$A_{banderuola} = 0,04 \times A_{rotore} = 0,04 \times 4,9 = 0,196m^2 \quad (5.1)$$

Nella fig. 54. si mostra un dettaglio del dispositivo di orientazione: esso consiste in una banderuola unita alla gondola mediante un supporto che se unisce alla base della stessa.

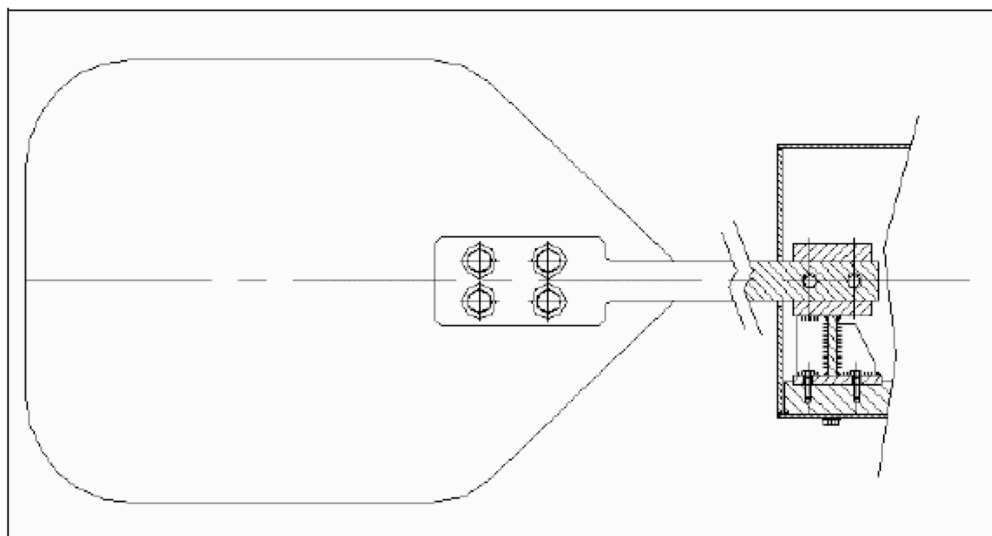


fig. 5.4. Dettagli della banderuola

5.2. Trasmissione della potenza

Normalmente l'asse del rotore (asse di bassa velocità) non si accoppia direttamente all'alternatore (asse ad alta velocità), poiché la velocità alla quale girano le pale è inferiore a quella dell'azionamento dell'alternatore, per cui è necessario intercalare un moltiplicatore tra la boccola e l'alternatore. Per realizzare l'unione mediante accoppiamento si uniscono l'asse di bassa velocità a un lato del moltiplicatore e l'alternatore all'altro (vedere fig.3.2.).

Ma c'è un altro tipo di soluzione, per macchine di piccole taglie, esistono nel mercato alternatori a magneti permanenti che permettono di accoppiare direttamente il rotore dell'alternatore all'asse sul quale si trova la boccola. Questa soluzione oltre ad essere più economica implica una riduzione di peso e di spazio nell'eolica, anzi è fattibile per piccoli generatori, per quel motivo si prenderà come soluzione questa alternativa.

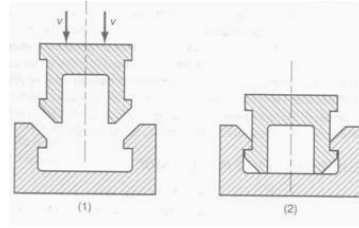
La trasmissione di potenza eolica si trasmette attraverso le pale alla boccola, e questo essendo accoppiato all'asse mediante un chiodo trasmette il paio all'asse. L'asse si sottomette grazie ad un compagno di cuscinetti ubicati in ogni estremo dell'asse mediante alcuni supporti. Dato che il rotore dell'alternatore si accoppia direttamente sull'asse della boccola, si realizza mediante un'unione con interferenza con una ghiera collegata al rotore.

5.2.1. Boccola

La boccola realizza l'unione tra le pale e l'asse, e s'incarica di trasmettere la potenza all'asse. Esistono diverse scelte di costruzione per aerogeneratori di piccola taglia:

- Asse prefabbricato per forgia dandogli già la forma della boccola. È una soluzione cara, poiché devono realizzare le matrici.
- Boccola unita per abbracciamento, cioè, mediante un'unione con interferenza.

Lo svantaggio è dovuto al collegamento finale non più reversibile: l'accoppiamento non può essere smontato.



- Boccola unita all'asse mediante il profilo striato. Questo tipo di soluzione è idoneo per trasmettere valori di pari elevati, benché il costo che suppone sia importante, poiché si bisogna fresare l'asse mediante rotolamento ed il cubo mediante pennellatura.
- Boccola unita all'albero mediante un chiodo.

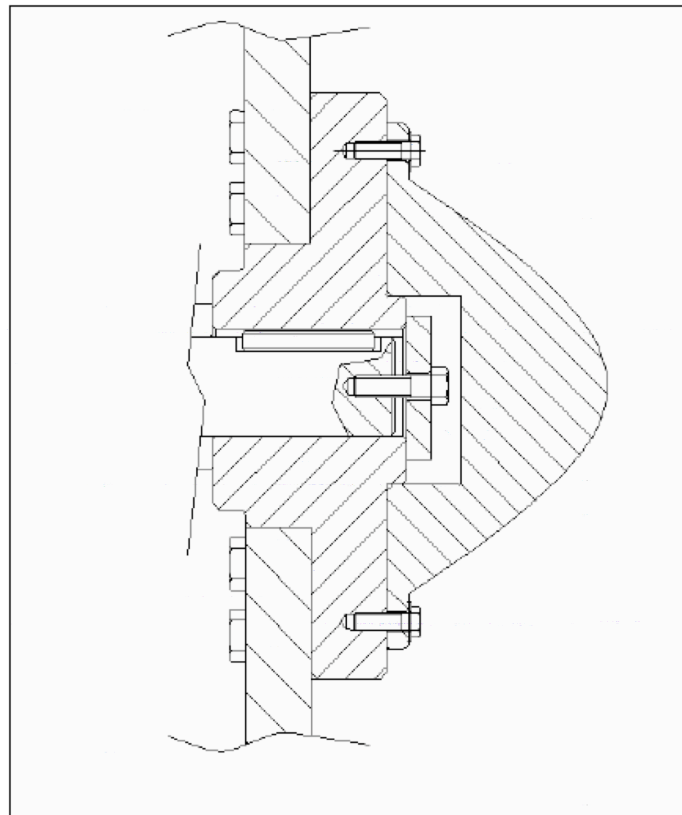


Fig. 5.5. Dettagli unione boccola-pale

L'ultima soluzione(vedere Fig. 5.5) è il più ragionevole in quanto a costo, poiché non è necessario realizzare le matrici per l'asse e bisogna solo meccanizzare il sedile per il chiodo nella boccola e l'asse. Il chiodo s'incarica di trasmettere tutto il paio all'asse per quello che deve realizzarsi l'accertamento. Egualmente, dovuto all'esistenza della forza centrifuga che sopportano le pale, bisogna assicurare che l'unione tra boccola e pale non pattinano, per ciò, devono comprovarsi le viti che realizzano detta unione alla forza separatoria alla che sono sommessi.

Sulla boccola si meccanizzano alloggi per potere fissare le pale mediante viti, per cui, lo stato superficiale di questi alloggi deve essere fino.

Dato che la boccola è un pezzo molto sollecitato (in quanto a cariche se riferisce) dovuto al paio che trasmette mediante il chiodo il materiale, deve essere d'acciaio ed in concreto si seleziona Acciaio St 60, poiché non è necessario utilizzare acciai di trattati (acciai di cementazione, nitruati...)

5.2.2. I cuscinetti

Si utilizzano due cuscinetti radiali a sfere, della casa SKF, ognuno in ogni estremo dell'albero. Uno di loro è libero ed un altro è fisso poiché oltre a sopportare il carico radiale sopporta il carico assiale dovuto allo sforzo aerodinamico del vento. I cuscinetti selezionati sono cuscinetti radiali a sfere, poiché la capacità di sopportare carico combinato è buona. Si verificano se i due cuscinetti sopportano le sollecitazioni che richiede l'applicazione tenendo in conto che il vento è variabile.

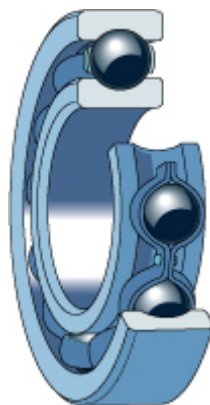


Fig. 5.2.2. Cuscinetto radiale a sfere, casa SKF

Dato che interessa minimizzare il mantenimento che si realizzi all'aerogeneratore si selezionano cuscinetti otturati che non devono essere lubrificati.

I due cuscinetti hanno l'anello interno girevole e l'anello esterno fisso e poiché la disposizione del carico è girevole (tenendo in conto lo squilibrio generato per le pale) per l'anello interno si progetta gioco e l'anello esterno si progetta con interferenza.

Il sistema di fissaggio dei cuscinetti all'asse è realizzato mediante una rondella di sicurezza ed un dado sciancrato per il cuscinetto B e per il cuscinetto A e mediante una ghiera che si intromette tra il cuscinetto e la boccola (vedere Fig. 5.6). Poiché il cuscinetto B è fisso poiché sopporta anche carico assiale, si impiega una briglia nel supporto del cuscinetto che fa pressione sull'anello esterno dello stesso per evitare il suo movimento. Questo cuscinetto trasmette la forza assiale che proviene dal vento e si trasmette per l'asse alla briglia, per quel motivo si deve verificare che l'unione che fa la briglia non si apra.

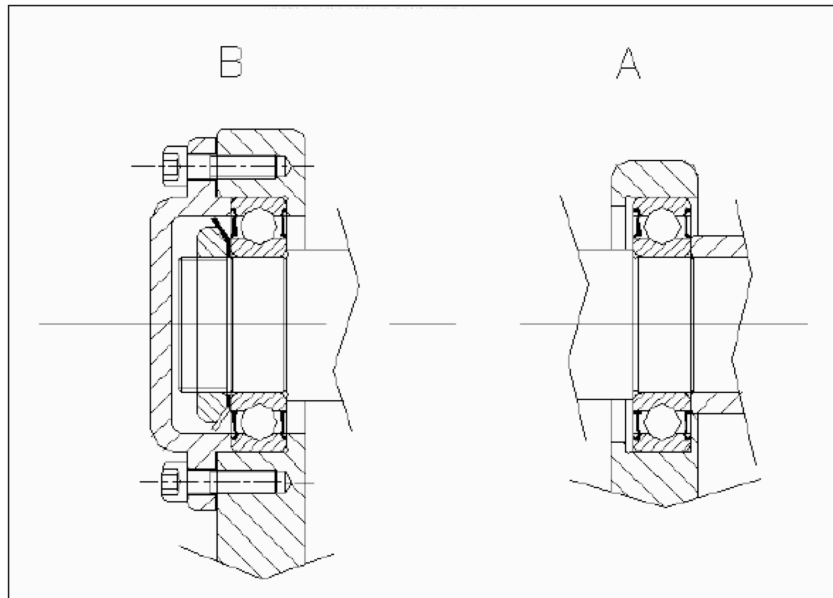


Fig. 5.6. Dettagli del sistema di fissaggio del cuscinetto A ed B

5.2.3.Asse orizzontale

Si seleziona Acciaio St 42, conformato per laminatura, idoneo per alberi moderatamente sollecitati poiché non è necessari acciai più sofisticati per questa applicazione. L'asse sopporta la fatica dovuta alla torsione del movimento rotatorio spinto per le pale.

L'asse si meccanizza, poiché su lui, si montano, il rotore all'alternatore, la ghiera con interferenza per collare il rotore, i cuscinetti, la ghiera e la boccola, oltre all'alloggio del chiodo che si realizza per fresato.

5.2.4.Unione rotore dell'alternatore con l'asse orizzontale.

Ci sono varie alternative per fissare il rotore dell'alternatore all'asse.

- Realizzare un'asse di diametro di 71mm invece di 56 mm, diametro interno del rotore dell'alternatore; corrisponde al massimo diametro dell'asse orizzontale, per potere collare il rotore dell'alternatore. Questa soluzione è molto cara, poiché bisogna meccanizzare 7,5 mm di materiale in quasi tutta la longitudine dell'asse per ottenere 12 mm di bottone di diametro 71 mm per fissare il rotore. Pertanto si scarta.
- Realizzare un'unione con chiodo tra il rotore e l'asse, ma dovuto al tipo del materiale del rotore che è ferro con proprietà magnetiche, non è vitale, poiché meccanizzando questo materiale potrebbero vedersi distorte le proprietà magnetiche del rotore.
- L'unione per interferenza risulta la più ragionevole ed economica nonostante non potere smontarla, vedere Fig. 5.7).

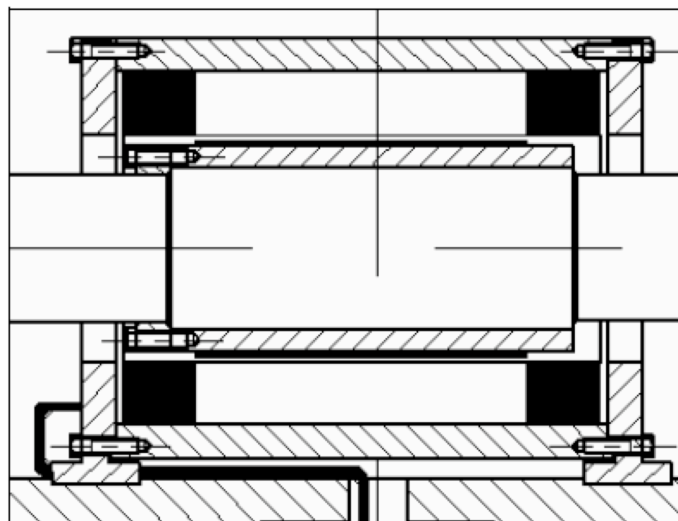


Fig. 5.7. Unione rotore-asse mediante interferenza

Si seleziona l'unione per interferenza tra l'asse ed il pezzo che collana il rotore. Il tipo d'interferenza incastri termico.

5.3 Gondola

La gondola consiste in una base dove si fissano tutti gli elementi e due carcasse (superiore ed inferiore) per chiudere l'insieme tale come si vede nella Fig. 5.8.

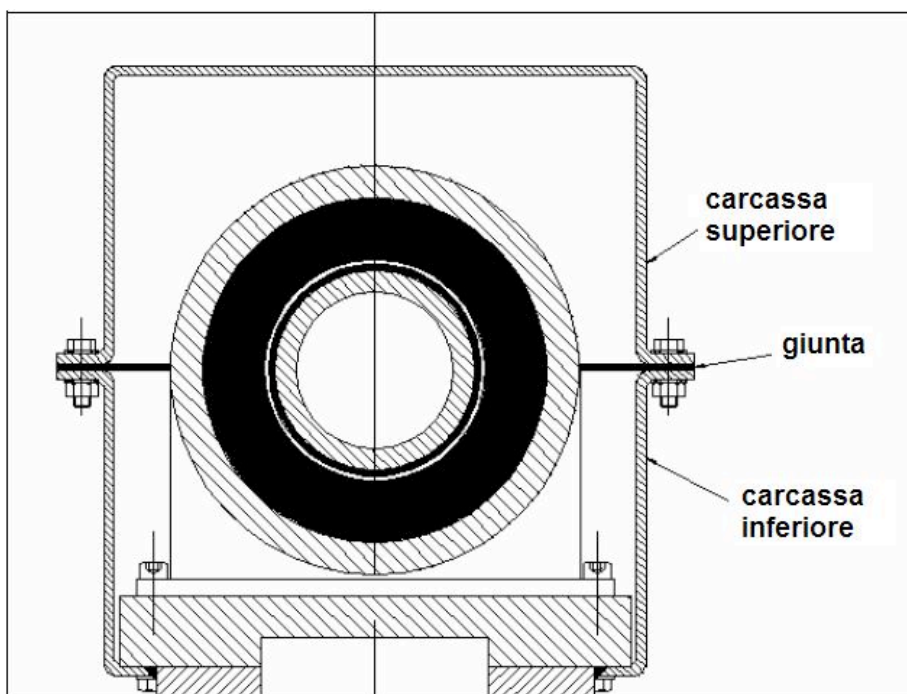


Fig. 5.8. Dettagli di una sezione frontale della gondola

Sulla base si meccanizzano alloggi per i supporti dei cuscinetti e questi si fissano alla stessa mediante saldatura per assicurare un corretto allineamento e non avere problemi

una volta si monti l'asse. Una volta saldati si meccanizzano gli alloggi dei cuscinetti. Bisogna considerare che le saldature soffriranno sforzi a flessione dovuto al componente assiale che sopporta il cuscinetto fisso, per questo motivo si verificano le saldature.

Sulla base si meccanizzano anche alloggi per le zampe dell'alternatore avendo in conto che le zampe ed i supporti devono rimanere completamente paralleli per evitare problemi d'allineamento tra rotore e statore. Si meccanizza anche un alloggio per collocare l'asse verticale ed un altro per collocare il supporto del dispositivo d'orientazione.

La rifinitura superficiale di questi alloggi deve essere fine per evitare problemi d'allineamento in il montaggio tra rotore e statore.

La gondola si chiude per evitare l'entrata di sporcizia mediante due carcasse, la carcassa inferiore che si fissa alla base ed il superiore che fissa all'inferiore, entrambe mediante viti. La carcassa inferiore potrebbe unirsi alla base per saldatura, ma allora non potrebbe smontarsi, per questo sono scelti i viti. Tra l'unione delle due carcasse si intercala una giunta per mantenere il tutto lo più stagno possibile l'interno della gondola.

Il tipo di materiale per realizzare la carcassa bisogna essere l'adeguato per imbottire e anche deve possedere buona saldabilità per quello che seleziona Acciaio St 37 per entrambi i parti.

5.4. Unione torre - gondola

La gondola o telaio deve potere girare liberamente rispetto alla torre, per ciò bisogna progettare un'unione che permetta questo movimento di rotazione. L'unione si realizza mediante un'asse verticale accoppiato alla base mediante un supporto con cuscinetti.

L'unione si divide in due pezzi, uno è l'asse ed un altro pezzo che fa di bottone tra la base e l'asse e fra loro si uniscono mediante saldatura. Questo ultimo pezzo dà più stabilità all'unione e si realizzano due pezzi separati per evitare di meccanizzare l'asse più di quello necessario, per quello che è una soluzione più economica, poiché si spreca meno materiale.

Un elemento da tenere in conto nella progettazione di questi collegamenti, è il cavo dell'alternatore. Una possibile scelta sarebbe installare un'unione per anelli di frizione affinché il cavo non soffra in caso che la gondola giri sempre nello stesso senso, ma il costo è elevato. Perciò, l'alternativa consiste nel far passare il cavo all'interno dell'asse. Si considera che il cavo è sufficientemente lungo in caso che girerà sempre verso lo stesso senso non ci sarebbe problema. Bisogna tenere in conto che il cavo che esce dall'alternatore è di Poliuretano, materiale con buona resistenza e rigidità meccanica. Per non dovere meccanizzare un buco per potere passare il cavo si compra già un'asse vuoto, di questa maniera si risparmia denaro in meccanizzare tutto il buco.

5.4.1. I cuscinetti

Per aerogeneratori di gran potenza si usano corone di cuscinetti, in particolare, cuscinetti di contatto angolare del Catalogo skf, poiché possono sopportare carico combinato, assiale e radiale.

Ci sono due tipi disposizioni per questo tipo di cuscinetti in assi:

- La disposizione in "X" è una brutta disposizione per sopportare carico radiali sull'asse
- La disposizione in "O" si usano per assi brevi e permette di sopportare carichi radiali oltre ad essere una disposizione che dà all'albero più stabilità. Per questo motivo si seleziona la disposizione in O.



Fig. 5.4.1. cuscinetto di contatto angolare in "O", Catalogo SKF

Come nel caso dell'asse orizzontale uno dei cuscinetti è fisso (sopporta carico assiale e radiale) e pertanto è fissato all'asse mediante una rondella di sicura ed un dado sciancrato e l'altro questo libero (solo sopporta la forza radiale).

I due cuscinetti hanno l'anello interno girevole e l'anello esterno fisso e poiché la disposizione del carico è girevole per l'anello interno si progetta gioco e l'anello esterno si progetta con interferenza.

L'unione rimane completamente chiusa per quello che si montano due lubrificanti, uno per ogni cuscinetto. Il tipo di grasso che si usa consiste in una grasse basi d'olio minerale (vedere Fig. 5.9). Per evitare che il grasso esca dalla zona di lavoro dei cuscinetti si monta un anello Nailon fissato all'interno del cuscinetto fisso.

I cuscinetti si verificano solo staticamente: non è necessario un dimensionamento a fatica, poiché normalmente la gondola gira lentamente.

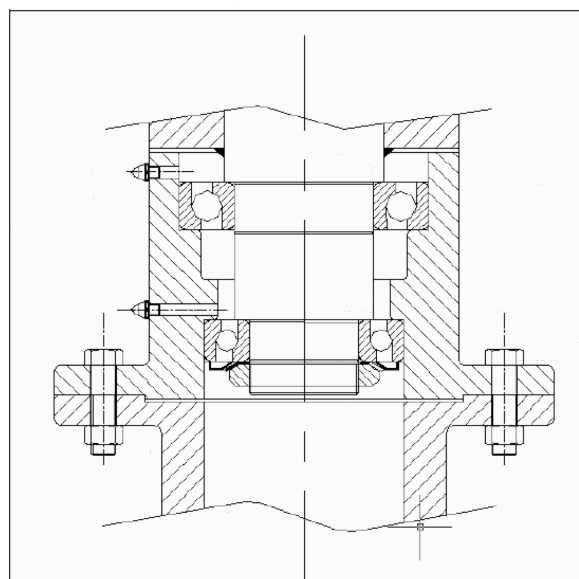


Fig. 5.9. Dettagli unione torre-gondola

5.4.2. Asse verticale

Sull'asse verticale (partendo di un'asse vuota) si montano i cuscinetti, che permettono fare girare la gondola ed il materiale che si seleziona per l'asse è Acciaio St 42 come nel caso dell'asse orizzontale. Questa unione gira molto lentamente e con minore frequenza che per quel motivo l'asse orizzontale non si calcola l'asse a fatica.

5.4.3. Sopperti cuscinetti

Il supporto dei cuscinetti dell'asse verticale serve da unione tra la gondola e la torre e si unisce a questa ultima mediante viti e dadi. Lo stato superficiale delle zone dove si alloggiano gli anelli esterni dei cuscinetti, deve essere fine. Il materiale che si sceglie per questo pezzo è Acciaio St 34 adeguato per la meccanizzazione alla quale deve essere sottomessolo.

5.5. Generatore

Il generatore è uno delle parti più importanti degli aerogeneratori. La sua missione è trasformare l'energia meccanica di rotazione in energia elettrica.

I generatori di corrente continua (dinamo) vengono usati in alcuni aerogeneratori di piccola potenza, tra 100 e 5000 W; normalmente le turbine vengono accoppiate con generatori alterni sincroni (alternatori), dotati di un maggiore rendimento, benché necessitino dell'ulteriore installazione di un elemento raddrizzatore. Quest'ultimo permette di utilizzare la corrente continua per immagazzinare l'energia in batterie ed all'uscita di queste un inverter per la conversione in corrente alternata. Nel caso di aerogeneratori con più di 10 kW di potenza si usano indistintamente generatori sincroni ed asincroni.

Per l'applicazione del nostro caso di studio, poiché la potenza richiesta è bassa, si stabilirà un generatore alternato sincrono.

Nella scelta degli alternatori ci sono varie alternative da tenere in conto:

ALTERNATORI

- Vantaggi: sono economici e generalmente si presentano armati
- Svantaggi: sono progettati per lavorare ad alte velocità il che rende necessario l'uso di moltiplicatori di giri, con relativa perdita di potenza, dovuta alla frizione. Costituiscono una soluzione più dispendiosa e richiedono un mantenimento frequente.

ALTERNATORI A MAGNETI PERMANENTI

- Vantaggi: sono economici, efficienti, robusti ed hanno un'enorme capacità di produzione. Questo tipo d'alternatori sono tra i più potenti esistenti sul mercato, in grado di lavorare con elevate efficienze sia alle alte che alle basse velocità. Non richiede manutenzione anche per la totale assenza di pezzi in contatto relativo. A parità di potenza è più leggero ed economico degli altri tipi d'alternatori.

- Svantaggi: La sua costruzione può essere molto complicata.

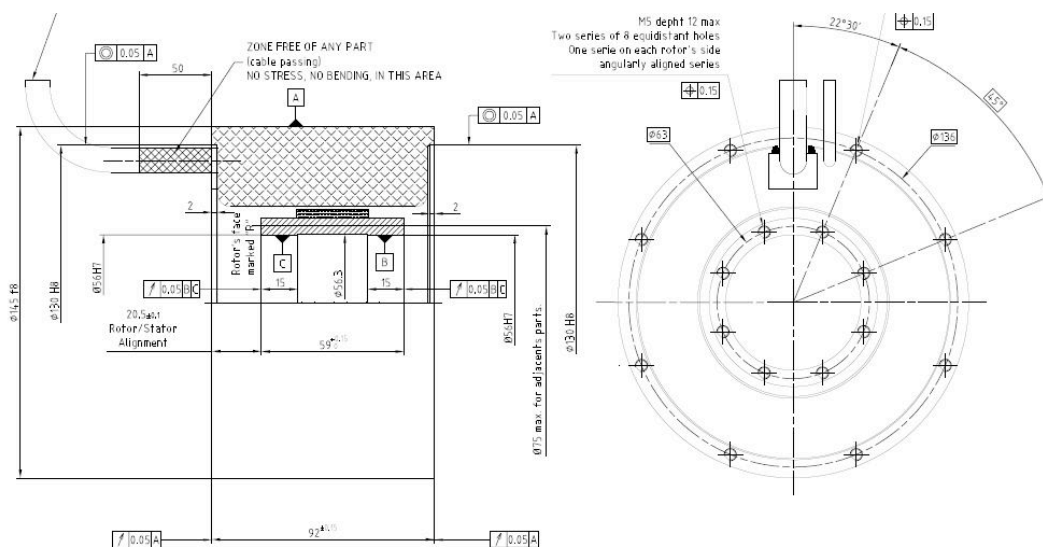
MOTORE AD INDUZIONE UTILIZZATO COME ALTERNATORE

- Vantaggi: Sono economici e relativamente semplici. Possiedono una buona efficienza alle basse velocità.
- Svantaggi: Sono inefficienti ad alte velocità e richiedono macchinari adatti.

Relativamente al caso di studio esaminato, l'ideale è l'utilizzo di un alternatore che sfrutti il massimo della potenza eolica, in un range molto ampio di funzionamento, comporti poca manutenzione e sia il più leggero possibile.

Seguendo questi tre criteri si seleziona un alternatore a magneti permanenti poiché malgrado gli alternatori classici siano economici è necessario installare un moltiplicatore tra l'alternatore ed il rotore, il che implica perdita di potenza (per effetto dell'accoppiamento) oltre a richiedere una manutenzione frequente, con relativo aggravio dei costi. I motori ad induzione che lavorano come alternatori non si verranno presi in considerazione, poiché possiedono buone efficienze solo a basse velocità.

Si scelgono dal catalogo ALXION gli alternatori 145 stk, gli unici con potenza pari a quella necessaria per l'applicazione; il resto del catalogo è costituito da macchinari troppo potenti. Inoltre, questa tipologia di alternatori presentano un peso inferiore. Nella Fig. 5.10 si mostra un grafico dove si vede per ogni tipo d'alternatore, di questa gamma, la potenza generata in funzione della velocità di rotazione [catalogo alxion].



ALXION

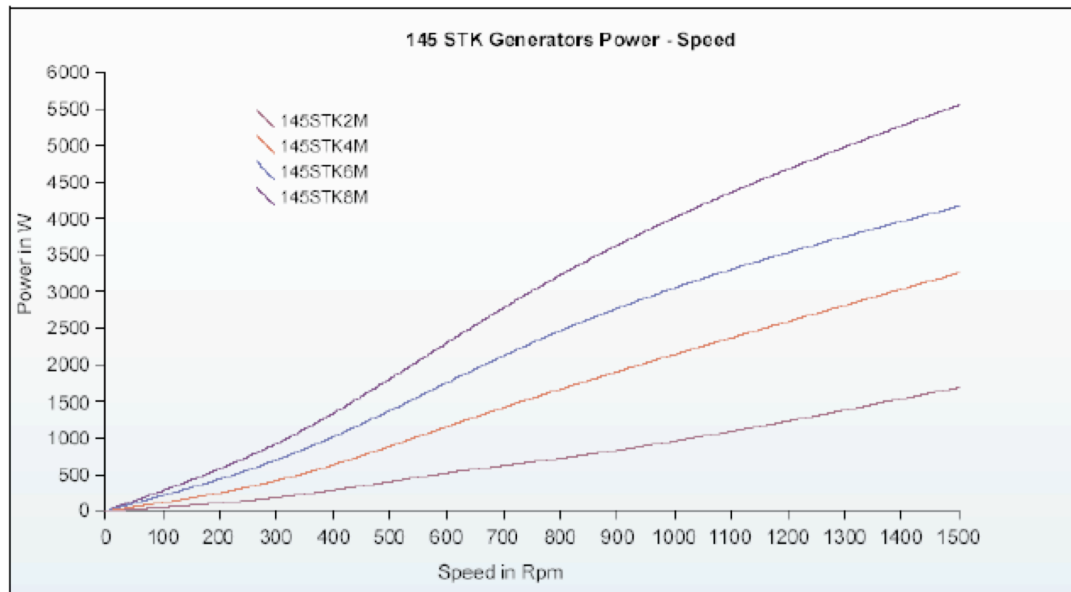


Fig. 5.10. Potenza (W) - Velocità Alternatore(m^{-1}) [5]

Nella tabella 5.1 sono evidenziate le potenze erogate dai vari modelli, in corrispondenza della velocità media del vento dell'ubicazione, ricavata nel Capitolo 4.

Alternatore	Potenza [W]
145 STK2M	250
145 STK4M	600
145 STK6M	1100
145 STK8M	1350

Tabella 5.1. potenza degli alternatori

La potenza nominale che bisogna coprire sono 1057,6 W per quello che seleziona il 145 STK 6M.

5.6. Sistema di frenaggio

Quando i venti sono troppo forti è necessario che l'aerogeneratore sia provvisto di un sistema che permetta diminuire le tensioni meccaniche delle pale. Ci sono varie possibilità per frenare l'aerogeneratore.

- Freni elettromagnetici: non sono idonei dato che hanno bisogno di corrente per potere lavorare cosa che complica il design dell'aerogeneratore.
- Freno aerodinamico per pale: questo tipo di freno si usa normalmente per aerogeneratori di gran potenza. Quando la velocità del vento è molto elevata le pale girano sul proprio asse, questo implica perdita di sostentamento e contemporaneamente provoca una diminuzione del rendimento aerodinamico che fa che il rotore giri più lento.

- Freno aerodinamico mediante torri ribaltabili (vedere Fig. 5.11), la torre oscilla rispetto al suolo e ciò permette di realizzare manovre di frenata (se la velocità del vento è molto elevata, in questo caso agirebbe come freno). Per realizzare queste manovre è necessario tendere la torre mediante cavi laterali per guidare la traiettoria di discesa e cavi negli altri due lati per salire o abbassarla. L'unione dei cavi al suolo si realizza mediante tensore, i quali permettono così la tensione di ogni cavo. I due cavi laterali devono essere collocati nello stesso piano orizzontale del piede del supporto della torre e devono allinearsi con l'asse di oscillamento di detto piede. Uno dei cavi si arrotola ad un argano meccanico azionato manualmente.

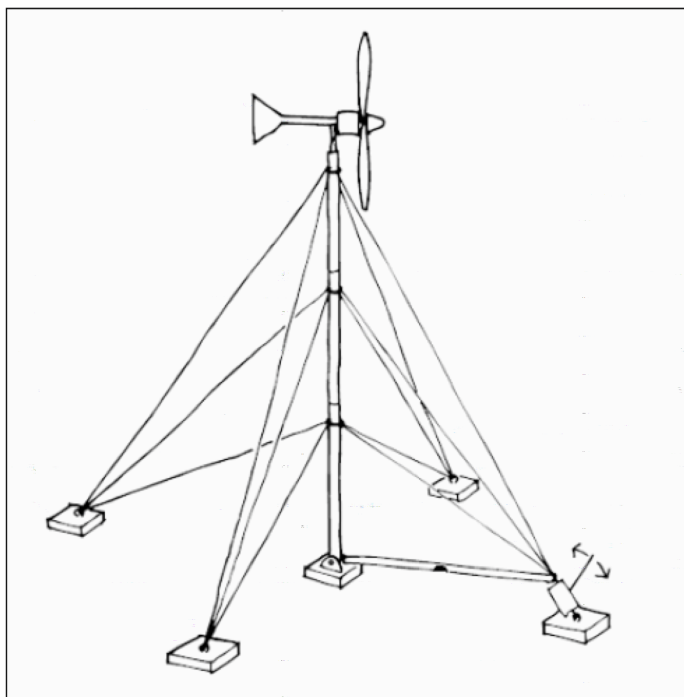


Fig. 5.11. Sistema di frenaggio mediante torre ribaltabile[6]

In caso di venti forti la forza del vento fa che il cavo si srotoli fino ad arrivare ad una situazione d'equilibrio (vedere Fig. 5.12), al che la superficie spazzata dalle pale, si trova inclinata rispetto al vento, comportando perdita nel rendimento delle pale e pertanto, nella velocità di giri di queste ultime. L'elevazione dell'insieme si realizza manualmente.

Di tutte le alternative esposte si seleziona il sistema di frenaggio mediante torre ribaltabile.

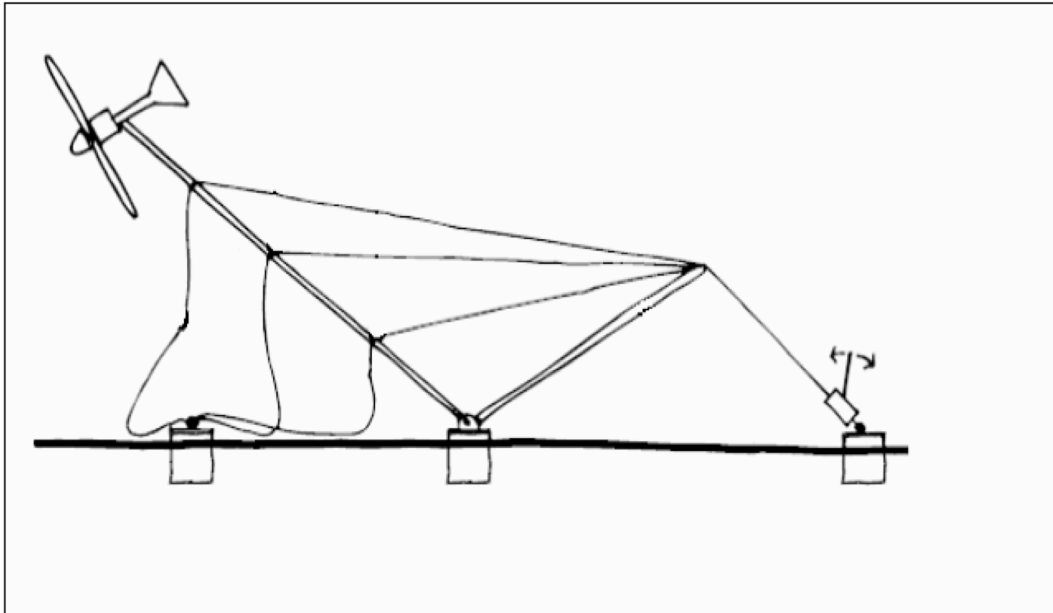


Fig. 5.12. Posizione di frenaggio per torri ribaltabili [6]

5.7. Pale

Per quanto riguarda l'ancoraggio delle pale con la boccola esistono due possibili soluzioni.

La prima prevede che le pale abbiano un passo variabile, ammettano rotazione controllata sul proprio asse attraverso alcuni cuscinetti. Questi movimenti sono controllati con precisione da una scheda di controllo elettronico. Il controllore elettronico misura diverse volte al secondo la potenza generata. Quando questa raggiunge valori troppo alti, il controllore invia l'ordine di passaggio al meccanismo di cambiamento d'angolo che fa girare leggermente le pale. Questo sistema richiede una ingegnerizzazione molto sviluppata per assicurare che le pale girino esattamente dell'angolo desiderato.

Le pale con passo fisso non ammettono rotazione sull'asse; in questo caso il controllo di potenza viene ottenuto mediante un design di perdita aerodinamica delle pale. Questo si ottiene ruotando la pala durante la sua asse, cioè, aumentando l'angolo di attacco di quello profilo della pala durante il suo asse. (NON E' CHIARO). Grazie a questo, la pala perde gradualmente la spinta di sostentamento evitando che si trasmetta una coppia eccessiva sul rotore. Questo tipo di soluzione è la più adottata in aerogeneratori di bassa potenza, poiché se confrontata con le pale a passo variabile, si evitano di installare parti mobili del rotore ed un complesso sistema di controllo che aumentano considerevolmente i costi.

Per la nostra applicazione si scelgono pale a passo fisso, per la maggiore semplicità ed il minore costo.

Il materiale utilizzato per le pale deve rispondere a frequenti variazioni nella velocità del vento ed a raffiche di venti forti. Per ciò il materiale delle pale deve essere:

- Leggero
- Perfettamente omogeneo
- Indeformabile

- Resistente alla fatica meccanica
- Resistente all'erosione ed alla corrosione
- Di costo basso affinché l'aerogeneratore sia di prezzo competitivo

Esistono varie possibilità:

- Legno: semplice, leggero, facile da lavorare e resiste bene alla fatica.
- Metalli: si impiegano leghe leggere di alluminio con silicio o con magnesio poiché con questi materiali si ottengono costi molto bassi se si producono in grandi serie. Uno degli svantaggi è che l'alluminio resiste male alla fatica, il che ne limita l'impiego.
- Materiali sintetici, resine, fibre e plastiche: emergono per il suo basso peso, insensibilità alla corrosione e la sua buona resistenza alla fatica ma il costo è più elevato che nei casi anteriori.

Per quest'applicazione si seleziona il legno come materiale delle pale, poiché compie con il sollecito ed il costo è più basso di un altro tipo di materiale.

5.8. Torre

La torre è elemento che sostiene tutto l'aerogeneratore. Esistono varie soluzioni possibili per il design della torre dipendendo dal volume dell'aerogeneratore.

Per grande aerogeneratori si trattano di torri tubolari di acciaio, fabbricate in sezioni di 20-30 m ed accoppiate con briglie negli estremi (vedere Fig. 5.13).



Fig. 5.13. Torri tubolari d'acciaio [1]

Un'altra alternativa sono le torri di persiana (vedere Fig. 5.14) che sono fabbricate utilizzando profili di acciaio soldati. Il vantaggio basilare di questo tipo di torri è il suo costo, poiché richiede solo la metà di materiale di una torre tubolare, con la stessa rigidità. Il peggiore aspetto visivo ne ha però fortemente condizionato lo sviluppo.



Fig. 5.14. Torre di persiana [1]

Molti degli aerogeneratori piccoli sono costruiti con torri d'albero di diametro contenuto, sostenute con cavi tensori. Il vantaggio è il risparmio di peso e pertanto di costo, vedere Fig. 5.15).



Fig. 5.15. torri di albero [1]

Le torri ibride, infine, sono torri realizzate con differenti combinazioni di quelle menzionate come quella che può osservarsi nella Fig 5.16 del che si potrebbe dire che è un ibrido tra una torre di persiana ed una torre tesa.



Fig. 5.16. torri ibride [1]

Poiché la potenza da generare è bassa, considerando le dimensioni ed il peso dell'aerogeneratore si applicherà l'alternativa di torre di albero, anche perché rappresenta la soluzione più idonea per l'installazione del sistema di frenaggio commentato in precedenza.

6. Manutenzione

Vanno distinte la manutenzione preventiva o pianificata e quella correttiva o non pianificata, in risposta a problemi emersi in corso di funzionamento.

Per quanto riguarda la manutenzione preventiva, devono realizzarsi ispezioni annuali di:

- accomodamento di dadi
- pale
- assi
- alternatore
- lubrificazione dei cuscinetti del supporto della gondola
- connessioni elettriche

7. Analisi economica

In questo capitolo si studiano tutti gli aspetti economici del progetto al fine di valutare la convenienza economica dell'investimento ed il suo rientro economico.

7.1. Sovraccosto iniziale

In tabella 8.1 si mostra una stima dei costi di investimento del progetto. La tavola fa differenze tra i componenti comprati e fabbricati. Nel prezzo dei componenti fabbricati si aggiunge il prezzo dei materiali utilizzati ed il costo della manodopera.

Tabella 8.1. Costi iniziali del progetto

COMPONENTI COMPRATI	PREZZO (€)
Alternatore	300
Batteria	250
Investitore	185
Raddrizzatore	185
Cuscinetto rigido di palle di contatto angolare 7211 B	40
Cuscinetto rigido di palle di contatto angolare 7214 B	40
2 cuscinetti rigidi di palle	45
2 lubrificanti	20
Altri: viti, dadi, rondelle, unisce.	35
COMPONENTI FABBRICATI	PREZZO (€)
Gondola	900
Pallade	200
Torre	300
TOTALE PRESUPPOSTO	2500

7.2. Studio della resa energetica

7.2.1. Calcolo del costo di generazione d'energia.

In questo sottoparagrafo si risolve il prezzo del kW·h generato per l'aerogeneratore di bassa potenza e così paragonandolo col prezzo del kW·h somministrato per le compagnie elettriche si potrà assicurare se il progetto è redditizio o no, economicamente parlando.

Il tasso interno di rendimento dipende dal tasso d'interesse applicato r e degli anni di vita utile dell'installazione n . Nella formula 8.1 si mostra la formula per calcolare il Tasso Interno di Rendimento (CIEMAT [Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas], Ministero di Scienza e Tecnologia della Spagna).

$$TIR = \frac{1}{\left(1 - \frac{1}{(1+r)^n}\right)^{\frac{1}{r}}} \quad (7.1)$$

Il tasso di interesse applicato “r” è il tasso di interesse mezzo del denaro al momento dello studio. Questo parametro fa sì che le spese finanziarie associate all’investimento, varino in modo che il prezzo dell’energia generata sia maggiore o minore. In quanto alla vita utile della pianta “n”, è il tempo stimato di funzionamento dell’installazione. Perciò stimando una r di 0,07 ed una n di 15 anni, nella formula 7.2 si mostra TIR per il progetto.

$$TIR = \frac{1}{\left(1 - \frac{1}{(1+r)^n}\right)^{\frac{1}{r}}} = \frac{0,07}{1 - \frac{1}{(1+0,07)^{15}}} = 0,1098 \quad (7.2)$$

Così la formula che fissa il costo di capitale CC per kW·h generato[3] (vedere formula 7.3) sarà funzione dell’investimento iniziale I, del tasso interno di rendimento TIR, della potenza dell’installazione P e del parametro denominato fattore di capacità FC, il quale rappresenta il quoziente tra l’energia prodotta annualmente in kW·h e quella che potrebbe produrre se l’aerogeneratore funzionasse continuamente.

$$Cc = \left(\frac{I}{P}\right) \left(\frac{TIR}{FC \times 8760}\right) \quad (7.3)$$

Nella formula 8.3 il prodotto al numeratore I·TIR rappresenta il costo del capitale per anno e il prodotto al denominatore rappresenta la produzione annuale di energia, espressa come prodotto della potenza, per il n di h in un anno (8760) per il fattore di capacità FC, che nell’ipotesi di funzionamento di circa 10,5 h/g è dato dalla:

$$FC = \frac{h_{funzionamento}}{h_{anno}} = \frac{10,5h / gg \times 365}{24h / gg \times 365} = 0,44 \quad (7.4)$$

Il costo del capitale sarà dato dalla:

$$Cc = \left(\frac{I}{P}\right) \left(\frac{TIR}{FC \times 8760}\right) = \left(\frac{2500}{1056,6}\right) \times \left(\frac{0,1098}{0,4375 \times 8760}\right) = 0,067 \text{ €/kW·h} \quad (7.5)$$

Finalmente, il costo di generazione d’ogni kW·h viene dato per la somma dei costi di capitale più quelli di operazione e mantenimento. Dentro i costi annuali verranno

inclusi i costi d'operazione e manutenzione stimati pari al 2 % dell'investimento iniziale, per cui:

$$Com = \frac{0,02 \times I}{P \times FC \times 8760} = \frac{0,02 \times 2500}{1,058 \times 0,4375 \times 8760} = 0,012 \text{ €/ kW}\cdot\text{h} \quad (7.6)$$

I

costi di generazione d'elettricità (7.7) sono la somma dei costi di capitale (7.5), più i costi d'operazione e mantenimento (7.6).

$$\text{Prezzo / kW}\cdot\text{h} = Cc + Com = 0,079. / \text{ kW}\cdot\text{h} \quad (7.7)$$

Tenendo in conto che il prezzo d'acquisto, stabilito per legge sta circa 0,1 €/ kW·h (Spagna) si deduce che il costo di generare 1 kW·h mediante energia eolica è più a buon mercato.

7.2.2. Calcolo del periodo di ritorno dell'investimento.

Il periodo di ritorno dell'investimento è il tempo che trascorre fino a che si ammortizza l'investimento. Per ciò bisogna studiare il movimento di fondi durante i primi anni di sfruttamento dell'installazione. Il movimento di fondi è la differenza tra spese ed entrate che genera l'investimento.

Le spese dell'installazione sono:

- Investimento iniziale
- Spese d'operazione e manutenzioni

Le entrate che genera l'installazione sono:

- Risparmio di consumo d'elettricità

Delle spese dell'installazione si conosce l'investimento iniziale, mentre le spese d'operazione e manutenzione si supporranno pari al 2 % dell'investimento iniziale [CIEMAT], fisse ed invariabili per tempo. Perciò in sintesi le spese dell'installazione sono:

$$\text{Spese} = Com = 0,02 \cdot I = 0,02 \cdot 2500 = 50\text{€} \quad (7.8)$$

Il risparmio di consumo d'elettricità si calcola con la fattura di elettricità annuale che dovrebbe pagarsi alla compagnia elettrica se si utilizzasse il servizio che offrono. La fatturazione basilare si comporsi di due termini:

- Termine di fatturazione di potenza: è il prodotto della potenza a fatturare, PF(kW) per il prezzo della potenza tp (€/kW·mese), per il numero di mesi N.
- Costo dell'energia; è il prodotto dell'energia consumata, EC (kW·h) per il prezzo del termine dell'energia tu (€/kW·h).

A questi due termini bisogna sommarlo l'affitto come l'IVA, 16 % sul totale della fattura(dati della Spagna). In Tabella 7.2 si mostra l'analisi dei costi d'elettricità.

POTENZA	$PF \cdot tp \cdot N$
ENERGIA	$EC \cdot te$
AFFITTO	$0,72 \cdot N$
TOTALE	$PF \cdot tp \cdot N + EC \cdot te + 0,72 \cdot N$
IVA	16%
TOTALE FATTURA	$1,16 \cdot (PF \cdot tp \cdot N + EC \cdot te + 0,72 \cdot N)$

Tavola 7. 2. Formato di fattura

I termini tp e ti sono classificati in funzione della tensione alla che si realizza la somministrazione e la potenza contrattata con la compagnia. In questo caso la somministrazione corrisponde ad un valore inferiore a 1000 V (Bassa tensione) ed ad una potenza contrattata di 4,4 kW (valore che si prende in presenza dei risultati dello studio elettrico realizzato in quello Capitolo4). Allora secondo questo le tariffe sono:

$$-tp = 1,69 \text{ €/kW} \cdot \text{mese}$$

$$-te = 0,10 \text{ €/kW} \cdot \text{h}$$

Per calcolare la fattura annuale d'energia è necessario calcolare l'energia consumata EC per anno. Dalla formula 4.6 si conosce l'energia consumata giornaliera e come fatto già nel Capitolo 4, si supporrà che la domanda d'energia elettrica sia costante durante tutto l'anno. L'energia consumata annualmente risulta:

$$EC = E \cdot 365 = 10095 \text{ W} \cdot \text{h/gg} \cdot 365 \text{ gg} = 3684,68 \text{ kW} \cdot \text{h} / \text{anno} \quad (7.9)$$

Il risparmio di consumo di energia elettrica risulterà:

$$\text{Risparmio} = 1,16 \cdot (4,4 \cdot 1,69 \cdot 12 + 3685,68 \cdot 0,1 + 0,72 \cdot 12) = 541,07 \text{ euros/año}, \quad (7.10)$$

In sintesi sapendo il costo dell'investimento iniziale, i costi di operazione e mantenimento e le entrate che si generano, risparmio di consumo di energia elettrica, può calcolarsi il periodo di ritorno dell'investimento. Nella Tabella 7.3 si dettaglia annualmente il movimento di fondi, dove si osserva che il periodo di ritorno, PAY - BACK, è di 4,1 anni.

	ORIZZONTE					
CONCETTO	0	1	2	3	4	5
Inversione	2500					
Costi	50	50	50	50	50	50
Totali pagamenti	2550	50	50	50	50	50

Totali riscossioni	541,07	541,07	541,07	541,07	541,07	541,07
Movimento dei fondi	-2008,93	491,07	491,07	491,07	491,07	491,07
Mov.dei fondi accumulati	-2008,93	-1517,86	-1026,79	-535,72	-44,65	446,42

Tabella 7.3. Movimento di fondi del progetto.

9. Analisi ambientale

L'analisi ambientale ha come obiettivo l'identificazione, la descrizione e la stima degli effetti prevedibili che il progetto in sé può provocare sulle risorse naturali e l'ecosistema. Per ciò si valuteranno i possibili impatti in tutte le fasi del progetto.

9.1. Fase di pianificazione e design

Dalla fase di concezione dell'aerogeneratore si devono tenere in conto certi aspetti che possono causare effetti importanti durante la fase di sfruttamento ed operazione. Uno degli effetti negativi che producono gli aerogeneratori è il rumore durante il funzionamento, per cui già in fase di progettazione si scelgono pale ed elementi meccanici di trasmissione che non producano molto rumore.

In questa fase, si deve cercare una collocazione ottimale tale che non generi un impatto visuale né un impatto derivato delle ombre che produce l'aerogeneratore come che rispetti l'avifauna esistente nella zona. È ovvio che ottenere un impatto nullo è impossibile, perciò si cercheranno posizioni dove questo sia minimo.

9.2. Fase di costruzione

Durante la fase di costruzione esiste un impatto considerabile sulla flora della zona di installazione dovuto a movimenti di terra, fondamenta, accessi, strade, etc. Nel caso di un aerogeneratore di bassa potenza, le conseguenze della sua installazione saranno minime, anche perché il terreno risulterà in tutto simile al resto dell'ambiente circostante.

9.3. Fase d'operazione

La fase d'operazione è una dei più importanti in quanto ad impatto ambientale, poiché devono considerare diversi aspetti, tali come l'impatto sulla fauna, l'impatto visuale, l'impatto derivato del rumore e l'impatto dell'ombra che produce l'aerogeneratore.

9.3.1. Impatto sulla fauna

Con riferimento agli effetti sull'avifauna, esistono casi puntuali di collisioni d'uccelli con turbine eoliche. Ancora così deve tenersi in conto le rotte di migrazione e zone peculiari con alto numero di specie sensibili o in pericolo d'estinzione. Di tutte maniere, trattandosi di un aerogeneratore di volume piccolo gli effetti degli uccelli sono minimi.

9.3.2. Impatto Visuale

Rispetto all'impatto visuale, sta rilevare la difficoltà di valutazione dello stesso, poiché se è verità che gli aerogeneratori attraggono l'attenzione, non è meno certo della reazione che provoca negli osservatori è soggettiva e difficile da quantificare.



9.3.3. Impatto derivato del rumore

L'impatto derivato del rumore che fanno gli aerogeneratori durante il suo funzionamento, può dividersi in due tipi in funzione della natura della sua fonte: rumore meccanico proveniente dal generatore, scatola moltiplicatori ed elementi di trasmissione e rumore aerodinamico prodotto per il movimento delle pale.

Il primo può ridursi migliorando il design delle pale, il secondo dipende dal numero di pale, delle forme delle stesse e delle turbolenze locali. Aumentando la velocità del vento, aumenta la velocità di rotazione e pertanto il rumore s'intensifica, per cui si raccomandano velocità del rotore non eccessive.

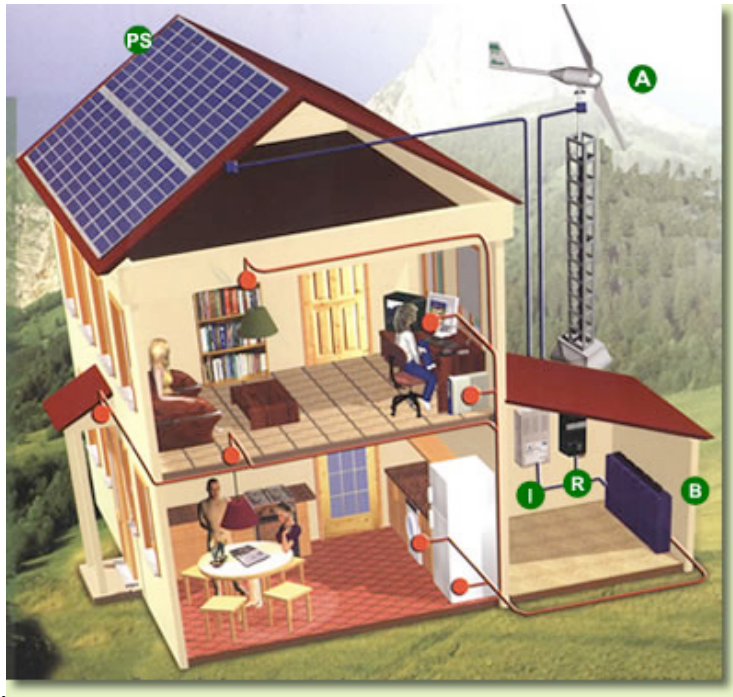
Ovviamente è indispensabile che l'aerogeneratore non superi i limiti di rumore fissati dalla normativa vigente.

9.3.4. Impatto derivato delle ombre

Gli aerogeneratori, come il resto di strutture alte, proiettano ombra nelle aree vicine quando il Sole è visibile. Se esistono persone che vivano vicino alla turbina possono essere disturbate se le pale del rotore tagliano la luce solare, causando un effetto di scintillio, quando il rotore sta in movimento. Se si conosce la zona dove il potenziale effetto di scintillio ha un determinato volume, si è capace di situare le turbine in modo che si eviti qualunque disturbo per i vicini.

Conclusioni

- ✓ Il costo di generazione di 1 kW·h da fonte eolica è sicuramente inferiore se confrontato con il costo del kWh elettrico acquistato da rete. In realtà l'energia eolica (parchi eolici) può competere in rendimento con altre fonti energetiche tradizionali come le centrali termiche di carbone, le centrali di combustibile e perfino con l'energia nucleare.
- ✓ Il rendimento di un impianto microeolico in genere dipende dal rendimento delle pale e del rendimento dell'alternatore. L'aspetto negativo è dovuto alla duplice conversione da energia eolica in energia meccanica (rendimento delle pale) e, quindi, da meccanica in elettrica (alternatore). L'utilizzo di sistemi di accumulo potrebbe permettere l'utilizzo dell'energia prodotta anche in assenza di fonte eolica, ma a discapito ulteriore del rendimento del sistema complessivo. La soluzione migliore è probabilmente l'installazione di sistemi ibridi, cioè, sistemi di generazione di energia elettrica composti da aerogeneratori ed un altro sistema tradizionale come per esempio motori diesel e/o altre fonti rinnovabili quali pannelli fotovoltaici.



- ✓ I costi di manutenzione sono ovviamente funzione del tipo d'alternatore scelto, così come anche il design risulta semplificato.
- ✓ Il pay back dell'investimento è di circa 4 anni a fronte degli 11 anni di vita dell'aerogeneratore.
- ✓ L'energia eolica non produce nessun agente inquinante che incida sull'ecosistema. Per ogni kW·h generato, mediante energia eolica, si evitano:
 - 0,60 kg di CO₂
 - 1,33 g di SO₂
 - 1,67 g di NO_x

Bibliografía

Riferimenti bibliografici

- [1] [<http://www.windpower.org>, Febrero 2008]
- [2] LE GOURIERES D., *Energía Eólica: Teoría, Concepción y Cálculo Práctico de las Instalaciones*. Ed. Masson. Barcelona, 1982.
- [3] CASTRO GIL M., *Energía Eólica*. Ed. Progensa. Sevilla, 1997.
- [4] [<http://www.aemet.es/es/vientos/anuario>, Enero 2008]
- [5] Catálogo Alternadores ALXION
- [6] [<http://www.greenhouse.gov.au/yourhome/technical/fs48.htm>, Febrero 2008]

Bibliografia complementare

- [www.enel.it]
- [<http://www.asdfhost.com/members/eolica/AeroG150.htm>]
- <http://www.leiger.com/Montaje%20de%20un%20aerogenerador.html>]
- [www.enea.it]
- [www.energoclub.it]
- [www.greencrossitalia.it]
- [<http://www.ibersolar.com>]
- [<http://www.cec.eu.int/res&rue/htm/dossier/1%20eolica.htm>]
- www.energoclub.it
- [<http://www.miliarium.com/Proyectos>]
- [www.greencrossitalia.it]
- [<http://www.personales.ya.com/universal/TermoWeb>]
- BIGORDÀ J. i FENOLLOSA J., *La fatiga dels elements mecànics*. Edicions UPC. Barcelona, 1997.
- RIBA ROMEVA C., *Construcció Soldada*. CPDA. Barcelona, 1998.
- FENOLLOSA, J. y MARTÍNEZ J., *CM1: Fallada, Unions Hertz*. CPDA., Barcelona 2002.
- FENOLLOSA, J. y MARTÍNEZ J., *CM2: Rodaments*. CPDA, Barcelona 2002.
- NIEMANN G., *Tratado Teórico-Práctico de Elementos de Máquinas, Volumen I*.
- CHEVALIER A., *Dibujo Industrial*. Editorial Limusa. México D.F., 2000.
- FERNÁNDEZ J.A. y CORZOS L., *Comentarios a las Normas UNE de Dibujo*.
- BAUTISTA J., COMPANYS R., RUA C., MATEO M. e IBÁÑEZ J.M. Organización

